STEPHEN HAWKING

SVEMIR u ORAHOVOJ LJUSCI

Svemir u orahovoj ljusci

Stephen Hawking

SADRŽAJ

PREDGOVOR ~ VII

POGLAVLJE 1 ~ stranica 3
Kratka povijest relativnosti
Kako je Einstein udario temelje za obje fundamentalne teorije dvadesetoga stoljeća: opću teoriju relativnosti i kvantnu teoriju.

POGLAVLJE 2 ~ stranica 29
Oblik vremena
Einsteinova opća teorija relativnosti daje oblik vremenu. Kako se to može dovesti u sklad s kvantnom mehanikom.

POGLAVLJE 3 ~ stranica *67*
Svemir u orahovoj ljusci
Svemir *ima višestruke povijesti, a svaka od njih određena je majušnim orahom.*

POGLAVLJE 4 ~ stranica 101
Predviđanje budućnosti
Kako gubitak informacija u crnim jamama može umanjiti našu sposobnost predviđanja budućnosti?

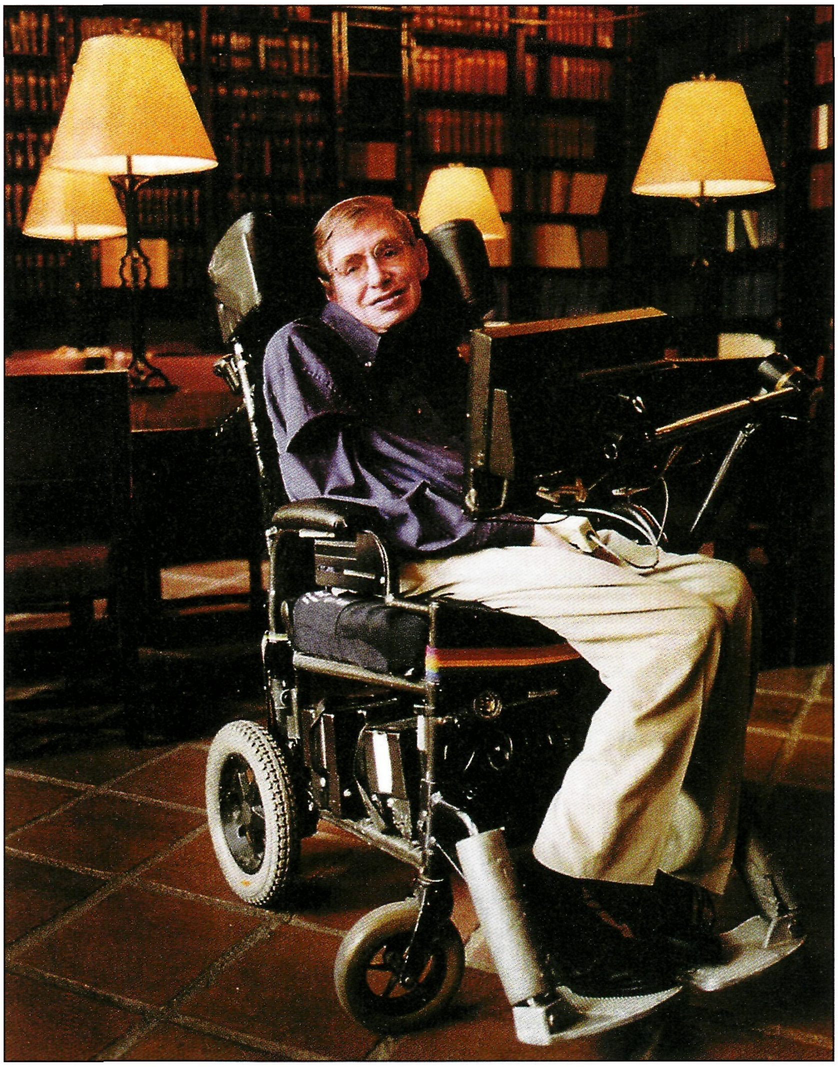
POGLAVLJE 5 - stranica 131
Zaštita prošlosti
Je li moguće putovanje kroz vrijeme? Može li neka razvijena civilizacija putovati u prošlost i promijeniti je?

POGLAVLJE 6 ~ stranica 155
Naša budućnost? *Zvjezdane staze* ili ne?
Kako će se rastuća složenost biološkog i elektronskog života razvijati sve većom brzinom.

POGLAVLJE 7 ~ stranica 173
Branski novi svijet
Živimo li na nekoj brani ili smo samo hologrami?

Rječnik ~ stranica 202
Preporuke za daljnje čitanje ~ stranica 209
Zahvale za ilustracije ~ stranica 210
Kazalo ~ stranica 211

Stephen Hawking, 2001., © *Stewart Cohen*.



P R E D G O V O R

NISAM OČEKIVAO DA ĆE MOJA ZNANSTVENO-POPULARNA KNJIGA *Kratka povijest vremena* doživjeti takav uspjeh. Ona se zadržala više od četiri godine na listi uspješnica londonskog *Sunday Timesa,* što je dulje od svih drugih knjiga, a svakako izuzetno za jednu ne baš laku. Često su me pitali kada ću napisati nastavak. Protivio sam se tome, jer nisam htio napisati *Sina Kratke povijesti* ili Nešto *dužu Povijest vremena,* kao i zato jer sam se bio posvetio istraživanjima. Ali vremenom sam uvidio da ima prostora za jednu drukčiju knjigu koja bi se mogla lakše shvatiti. *Kratka povijest vremena* zamišljena je na linearan način, u smislu da je većina poglavlja slijedila iz prethodnih i bila logički zavisna od njih. Ovo se sviđalo nekim čitateljima, ali drugi su zapeli na uvodnim poglavljima, tako da uopće nisu stigli do uzbudljivijih stranica koje su slijedile. Suprotno tome, ova knjiga više nalikuje stablu: prvo i drugo poglavlje oblikuju središnje deblo s kojeg se granaju ostala poglavlja.

Ove grane međusobno su prilično nezavisne i može im se pristupiti bilo kojim redoslijedom nakon središnjeg debla. One odgovaraju područjima kojima sam se na ovaj ili onaj način bavio kasnije, nakon objavljivanja *Kratke povijesti vremena.* Ta poglavlja, dakle, prikazuju neka od najaktivnijih područja suvremenih istraživanja. Unutar svakog poglavlja nastojao sam izbjeći jedinstvenu linearnu građu. Ilustracije i potpisi koji idu uz njih nude alternativni put kroz knjigu, kao u *Ilustriranoj kratkoj povijesti vremena,* objavljenoj 1996., a okviri pružaju priliku da se podrobnije izloži neka pojedinost negoli je to bilo moguće u glavnom tekstu.

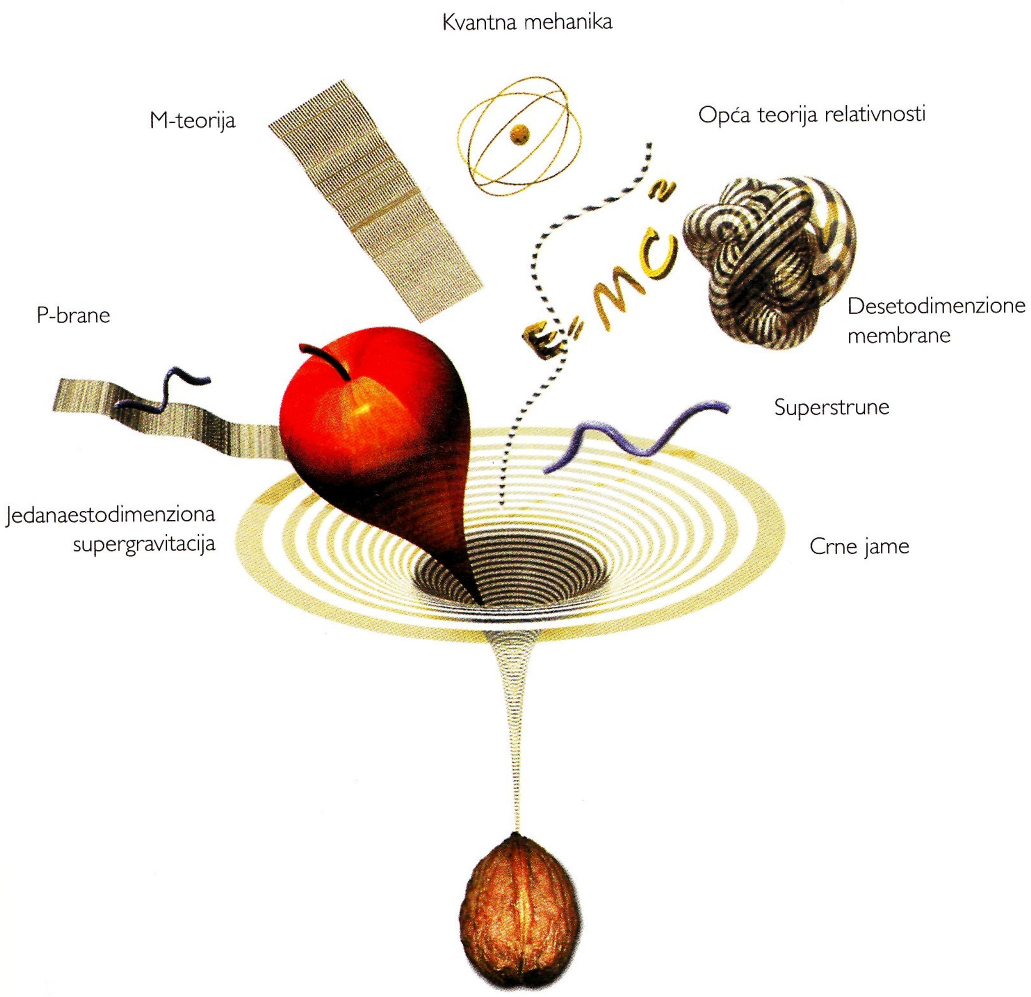
Kad je *Kratka povijest vremena* prvi put objavljena 1988., izgledalo je da je konačna teorija svega tik iza obzora. Koliko su se okolnosti od tada promijenile? Jesmo li se uopće približili našem cilju? Kao što će biti opisano u ovoj knjizi, u međuvremenu smo prevalili dugi put. Ali putovanje i dalje traje, a kraj mu još nije na vidiku. Suglasno jednoj drevnoj izreci, bolje je putovati pun nade nego stići. Zelja za otkrićima potiče našu kreativnost na svim poljima, ne samo u znanosti. Ako bismo stigli do kraja, ljudski duh bi se zgrčio i umro. Ali mislim da nikada nećemo mirovati: povećavat će nam se složenost, ako već ne i dubina, i uvijek ćemo se nalaziti u središtu sve šireg obzorja mogućnosti.

Želim podijeliti svoje uzbuđenje izazvano otkrićima do kojih se dolazi i slikom stvarnosti koja iz njih izvire. Zbog većeg osjećaja neposrednosti, usredotočio sam se na područja na kojima sam osobno radio. Pojedinosti ovoga rada vrlo su stručne, ali uvjeren sam da se temeljne zamisli mogu prenijeti bez previše matematičke prtljage. Preostaje mi samo nada da sam u tome uspio.

Dobio sam izdašnu pomoć u radu na ovoj knjizi. Posebno bih spomenuo Thomasa Hertoga i Neela Shearera te Ann Harris i Kittv Ferguson, koji su urednički obradili rukopis (ili, točnije, fajlove, budući da je sve što pišem u elektronskom obliku) i Philipa Dunna iz firme "Book Laboratory and Moonrunner Design", autora ilustracija. Zahvalnost također dugujem svima onima koji su mi omogućili da vodim razmjerno normalan život i da se bavim istraživanjima. Bez njih ova knjiga ne bi mogla biti napisana.

Stephen Hawking
Cambridge, 2. svibnja 2001.

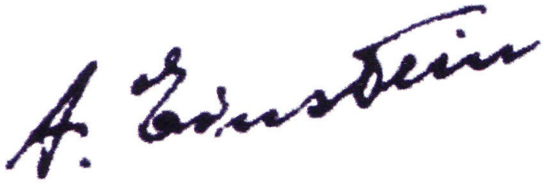
P R E D G O V O R


Kvantna mehanika
M-teorija
Opća teorija relativnosti
P-brane
Desetodimenzione membrane
Superstrune
Jedanaestodimenziona supergravitacija
Crne jame

POGLAVLJE 1

KRATKA POVIJEST RELATIVNOSTI

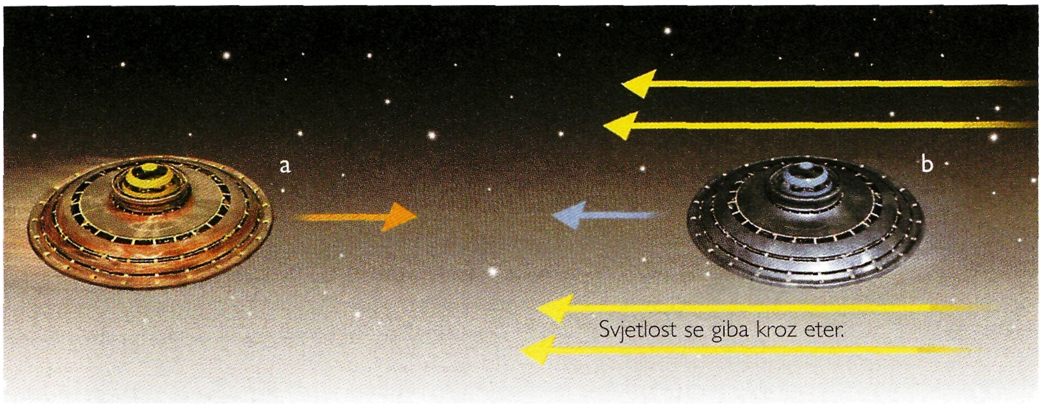
Kako je Einstein udario temelje za obje fundamentalne teorije dvadesetoga stoljeća: opću teoriju relativnosti i kvantnu teoriju.



ALBERT EINSTEIN, TVORAC SPECIJALNE I OPĆE TEORIJE RELATIVNOSTI, rođen je u Ulmu, u Njemačkoj, 1879., ali obitelj mu se već sljedeće godine preselila u Munchen, gdje su mu otac Hermann i stric Jakob osnovali malu električarsku radionicu. Albert nije bio čudo od djeteta, ali tvrdnje da mu je u školi išlo slabo izgleda da su pretjerane. Godine 1894. očev posao je propao i obitelj se preselila u Milano. Roditelji su odlučili da on ostane u Miinchenu i ondje završi školu, ali njemu se nije sviđala tamošnja čvrsta stega i on napušta gimnaziju, pridruživši se obitelji u Italiji. Kasnije je završio školovanje u Zurichu, diplomiravši 1900. na uglednoj Tehničkoj visokoj školi, poznatoj i dan-danas po kratici ETH. Njegova buntovnička priroda i odbojnost prema autoritetima nisu ga učinile omiljenim ni medu profesorima ETH, tako da mu nitko nije ponudio položaj asistenta, što je bio uobičajeni korak u akademskoj karijeri. Dvije godine nakon diplomiranja konačno se uspio zaposliti kao pripravnik u Švicarskom patentnom zavodu u Bernu. Dok je radio na tome mjestu, objavio je, 1905. godine, tri rada koja su ga učinila jednim od najvećih svjetskih znanstvenika, a ujedno su i temelj za dvije znanstvene revolucije — revolucije koje će promijeniti naše razumijevanje vremena, prostora i same stvarnosti.

Krajem 19. stoljeća znanstvenici su vjerovali da su sasvim blizu potpunome opisu svemira. Zamišljali su da je svemir ispunjen neprekidnim medijem, nadjenuvši mu ime "eter". Svjetlosne zrake i radiosignali bili su valovi u eteru, baš kao što je zvuk niz tlačnih valova u zraku. Za potpunu teoriju bila su neophodna jedino pažljiva mjerenja elastičnih svojstava etera. Planirajući takva mjerenja, laboratorij Jefferson pri Sveučilištu Harvard bio je sagrađen bez željeznih čavala, kako oni ne bi utjecali na fina mjerenja magnetizma. Graditelji su, međutim, smetnuli s uma da crvenkasto-smeđe opeke, od kojih je zidan laboratorij, jednako kao i glavnina Harvarda, sadrže velike količine željeza. Ta zgrada i dalje je u uporabi, premda na Harvardu nisu više sigurni koliku težinu može još izdržati knjižnični pod bez željeznih čavala.

Albert Einstein 1920.



(IL. I. I, gore)
TEORIJA NEPOKRETNOG ETERA

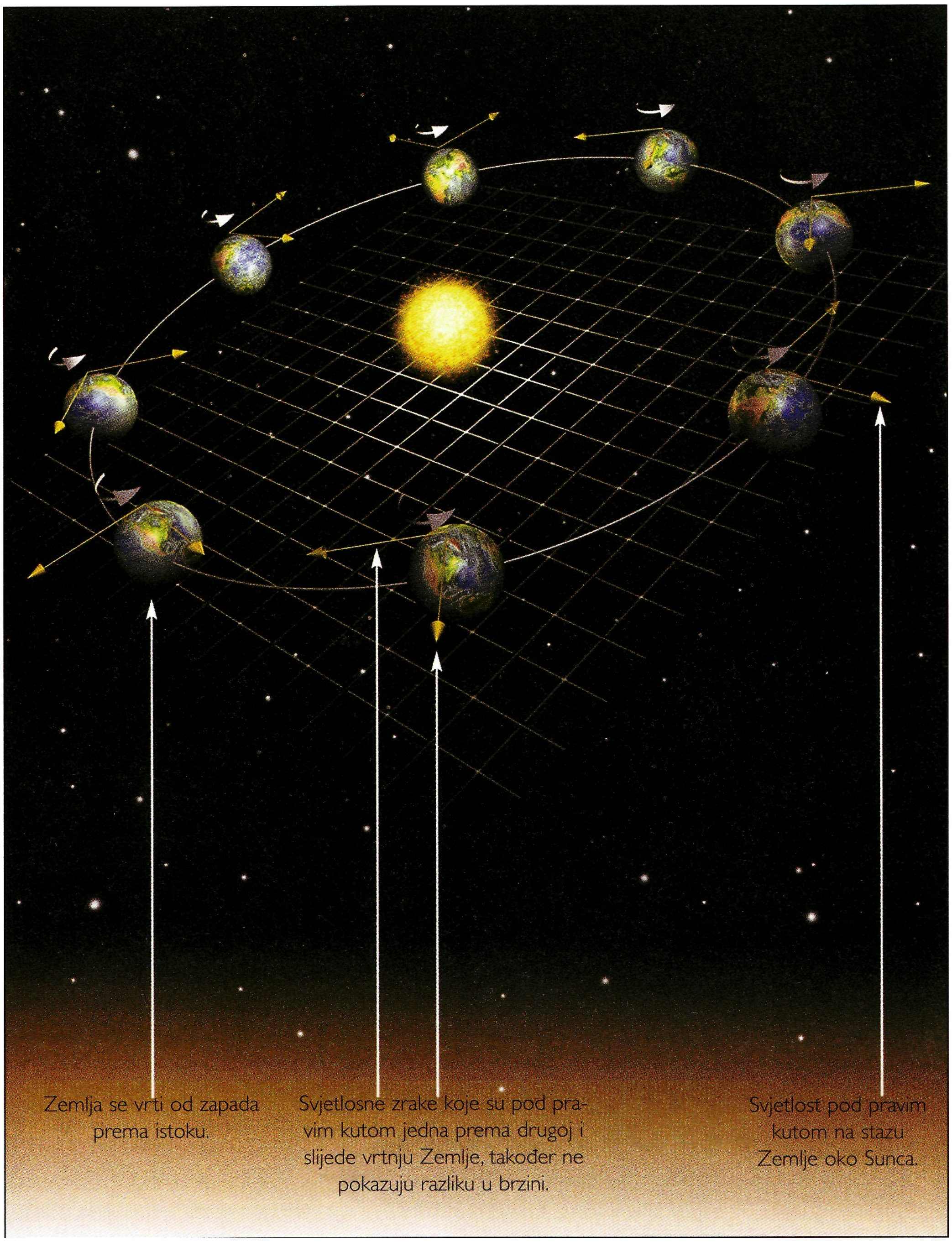
Da je svjetlost val u elastičnoj tvari zvanoj eter, njena brzina izgledala bi veća promatraču na svemirskom brodu (a) koji se giba prema njoj, a manja promatraču u svemirskom brodu *(b)* koji se kreće u istom smjeru kao i svjetlost.

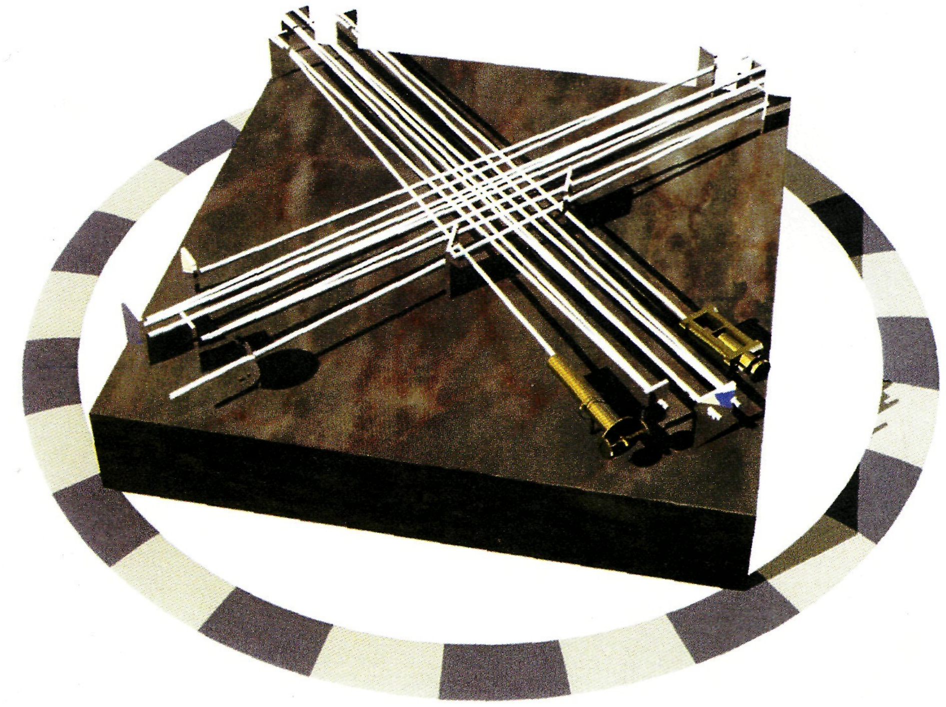
(IL 1.2, sljedeća str 7)
Nije ustanovljena nikakva razlika između brzine svjetlosti u smjeru Zemljine staze i u smjeru pod pravim kutom u odnosu na nju.

Krajem stoljeća počele su se pojavljivati pukotine u zamisli o sveprisutnom eteru. Smatralo se da svjetlost treba putovati nepromjenjivom brzinom kroz eter, ali ako se gibate u smjeru u kojem i svjetlost, njena brzina izgledala bi manja, dok biste u obratnom slučaju, ako se gibate u smjeru suprotnom od svjetlosti, izmjerili veću brzinu. (il. 1.1).

Brojni pokusi nisu, međutim, potvrdili ovu pretpostavku. Najpažljivije izveden i najtočniji pokus izveli su Albert Michelson i Edward Morlev iz Caseove škole za primijenjenu znanost u Clevelandu, Ohio, 1887. Oni su usporedili brzinu svjetlosti dvaju snopova koji su stajali pod pravim kutom jedan u odnosu na drugi. Kako Zemlja rotira oko svoje osi i putuje oko Sunca, mjerni aparat kreće se kroz eter, mijenjajući brzinu i pravac (il. 1.2). Ali Michelson i Morlev nisu uočili dnevne ili godišnje razlike između brzine dvaju snopova svjetlosti. Izgledalo je da se svjetlost stalno giba istom brzinom u odnosu na promatrača, bez obzira na to kojom se brzinom i u kojem pravcu on gibao (il. 1.3, strana 8).

Znajući za Michelson-Morleyev pokus, irski fizičar George FitzGerald i nizozemski fizičar Hendrik Lorentz izložili su zamisao da se tijela koja se kreću kroz eter skraćuju, a ure usporavaju. Ovo skraćivanje i usporavanje ura bili bi takvi da bi svi promatrači mjerili istu brzinu svjetlosti, bez obzira na to kako se gibaju u odnosu na eter. (FitzGerald i Lorentz i dalje su smatrali da je eter stvarna tvar.) Međutim, u jednom radu objavljenom u lipnju 1905. Einstein je istaknuo da ako promatrač ne bi mogao ustanoviti giba li se kroz

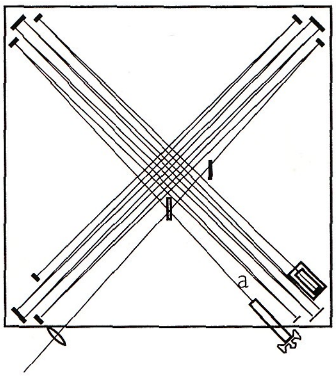

Zemlja se vrti od zapada prema istoku.
Svjetlosne zrake koje su pod pravim kutom jedna prema drugoj i slijede vrtnju Zemlje, također ne pokazuju razliku u brzini.
Svjetlost pod pravim kutom na stazu Zemlje oko Sunca.

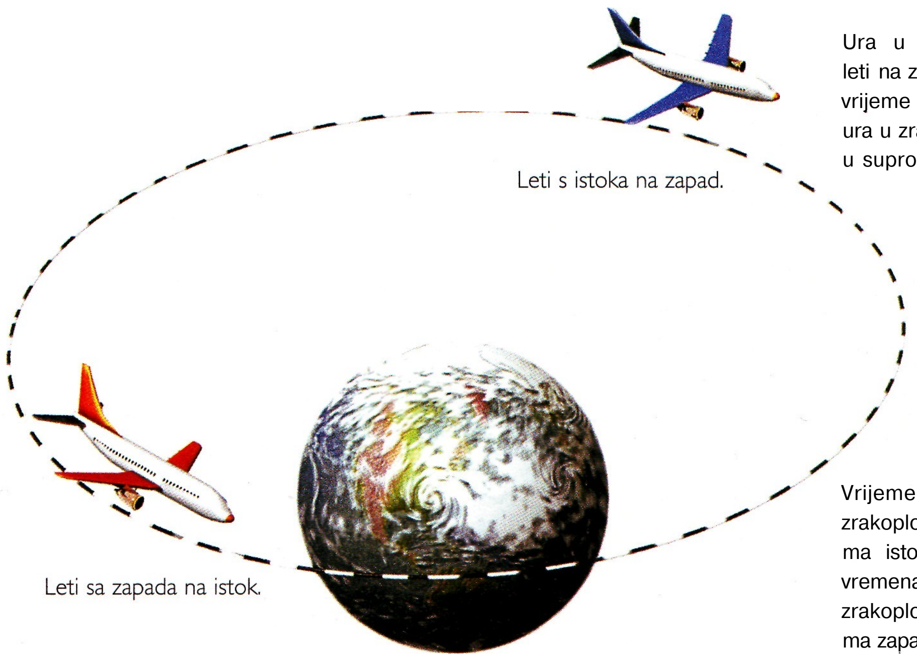


(IL. 1.3) MJERENJE BRZINE SVJETLOSTI

U interferometru Michelsona i Morleya svjetlost iz nekog izvora razdvaja se na dvije zrake pomoću polupropusnog zrcalaTe dvije svjetlosne zrake putuju okomito jedna prema drugoj, da bi se potom ponovno združile u jedinstvenu zraku preko polupropusnog zrcala. Razlika u brzini obje - na dijelu puta razdvojene - svjetlosne zrake zamijetila bi se po promjeni interferencijskog uzorka nastalog zbog pojačavanja i potiranja bregova i dolova svjetlosnih valova. Pokus je vrlo točan i pokazao bi razliku — kad bi je bilo - između brzine svjetlosti iz dva okomita mjera

Desno: Dijagram pokusa prema prikazu objavljenom u časopisu Scientific *American* 1887.





Ura u zrakoplovu koji leti na zapad bilježi duže vrijeme nego isto takva ura u zrakoplovu koji leti u suprotnom smjeru.

Vrijeme za putnike u zrakoplovu koji leti prema istoku kraće je od vremena za putnike u zrakoplovu koji leti prema zapadu.

prostor ili ne, zamisao o eteru postala bi suvišnom. Umjesto toga, on je pošao od postulata da bi zakoni fizike trebali izgledati isto za sve promatrače u slobodnom gibanju. Usto, oni bi svi morali mjeriti istu brzinu svjetlosti, bez obzira na to koliko se brzo gibali. Brzina svjetlosti nezavisna je o gibanju promatrača i ista je u svim pravcima.

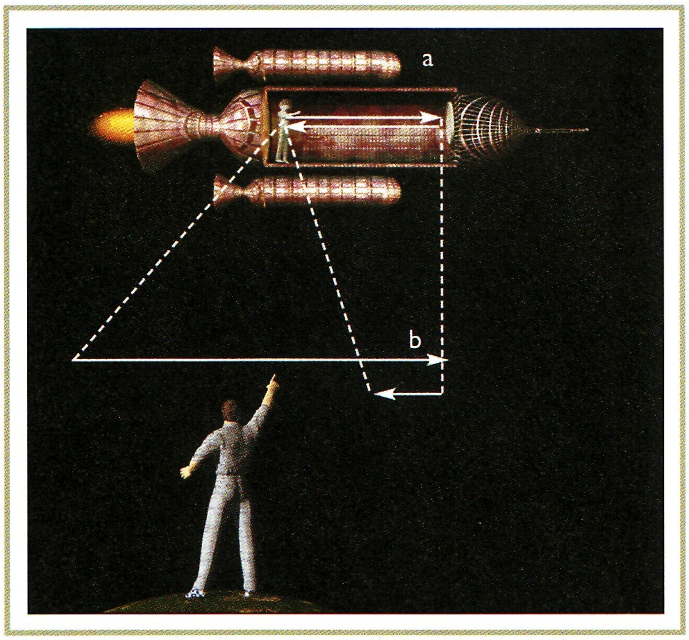
Ovo je zahtijevalo odustajanje od zamisli da postoji opće svojstvo zvano vrijeme, što bi ga mjerile sve ure. Umjesto toga, svaki promatrač imao bi vlastito vrijeme. Vremena dva promatrača podudarala bi se samo ako bi oni bili u stanju mirovanja jedan u odnosu na drugoga, ali ne i gibanja jedan u odnosu na drugoga.

To je potvrdilo i više pokusa, na primjer onaj s dvije točne ure u zrakoplovima koji su letjeli u suprotnim smjerovima oko svijeta. Ure su pokazale sasvim malu, ali mjerljivu, razliku u vremenu (il. 1.4). Dakle, ako netko želi živjeti duže, treba letjeti prema istoku. Djelić sekunde dužeg života koji bi se time dobio bio bi i više nego potpuno poništen hranom serviranom u avionima.

(IL 1.4)
Jedna verzija paradoksa blizanaca (Il. 1.5, stranica 10) provjerena je eksperimentalno tako što su dvije vrlo točne ure letjele u suprotnim smjerovima oko svijeta.

Kada su nakon toga uspoređene, ura koja je letjela prema istoku izmjerila je nešto manje proteklo vrijeme, odnosno kasnila je u odnosu na drugu.

c
a
a2
b
b2



(I I 1.5, lijevo)
PARADOKS BLIZANACA

U teoriji relativnosti svaki promatrač ima vlastitu mjeru vremena. To može dovesti do takozvanog paradoksa blizanaca.

Blizanac (a) polazi na svemirsko putovanje brzinom bliskom svjetlosnoj (c), dok njegov brat blizanac (b) ostaje na Zemlji.

Zbog gibanja svemirskoga broda, blizancu na Zemlji izgleda da vrijeme njegovog brata (a) teče sporije. Nakon povratka kući, svemirski putnik (a2) ustanovit će da mu je brat (b2) znatno više ostario nego on.

lako se zdrav razum protivi ovome, više pokusa potvrdilo je da bi u ovakvom scenariju blizanac-putnik zaista bio mlađi.

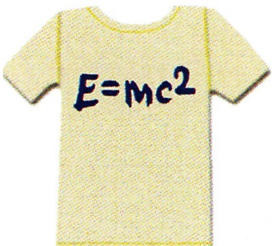
(IL1.6, desno)
Svemirski brod prolazi pokraj Zemlje slijeva nadesno brzinom koja iznosi četiri petine svjetlosne. Svjetlosni signal šalje s jednog kraja kabine prema zrcalu na drugome kraju (a),

Tu svjetlost promatraju ljudi na Zemlji i u svemirskom brodu, Zbog gibanja svemirskog broda, oni se neće slagati glede udaljenosti koju je svjetlost prevalila do zrcala i natrag *(ti)*.

Dakako, razilazit ce se i o tome koliko je vremena trebalo svjetlosti da prijeđe tu udaljenost, zato jer je, prema Einsteinovom postulatu, brzina svjetlosti ista za sve promatrače koji se slobodno gibaju

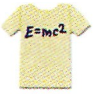
Einsteinov postulat da zakoni fizike trebaju izgledati isto svim promatračima u slobodnom gibanju temelj je teorije relativnosti, jer podrazumijeva da je važno samo relativno gibanje, gibanje nečeg u odnosu na nešto. Ljepota i jednostavnost teorije uvjerile su mnoge mislioce, ali bilo je i mnogo protivnika. Einstein je zbacio dva apsoluta znanosti devetnaestoga stoljeća: apsolutno mirovanje, predstavljeno eterom, i apsolutno ili sveopće vrijeme što bi ga mjerile sve ure. Za mnoge ljude ovo je bila uznemirujuća zamisao. Znači li to, pitali su oni, da je *sve* relativno, da ne postoje apsolutna moralna načela? Nelagodnost se nastavila kroz dvadesete i tridesete godine. Kada je Einstein dobio Nobelovu nagradu 1921., ona mu je dodijeljena za značajan, ali (u njegovom slučaju) razmjerno nebitan rad, također objavljen 1905. U obrazloženju nagrade nije se spominjala relativnost koja je tada još smatrana previše proturječnom. (Ja još uvijek dobivam dva ili tri pisma tjedno u kojima me ljudi uvjeravaju da Einstein nije u pravu.) Danas je teorija relativnosti potpuno prihvaćena u znanstvenoj zajednici, a njena predviđanja potvrđena su nebrojeno puta.

IL 1.7



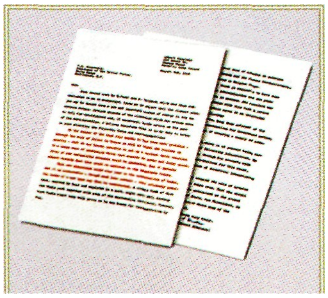
Vrlo značajna posljedica relativnosti je odnos između mase i energije. Iz Einsteinovog postulata da brzina svjetlosti treba biti ista za sve promatrače proizlazilo je da se ništa ne može gibati brže od svjetlosti. Događa se sljedeće: kako se povećava energija da bi se nešto ubrzalo, svejedno je li čestica ili svemirski brod, masa također raste, što otežava daljnje ubrzavanje. Ubrzati neku česticu do brzine svjetlosti bilo bi nemoguće, jer bi za to bila potrebna beskonačna količina energije. Masa i energija su ekvivalentne, kako je to sažeto prikazano u Einsteinovoj slavnoj jednadžbi $E = mc^2$ (il. 1.7). Ovo je vjerojatno jedina jednadžba iz fizike koja se može sresti na ulici. Jedna od njenih posljedica je da ako se jezgra atoma uranija raspadne na dvije jezgre s nešto manjom ukupnom masom, oslobađa se ogromna količina energije (vidjeti il. 1.8).

Godine 1939., kada je izbijanje novog svjetskog rata već bilo na vidiku, jedna skupina znanstvenika uvjerila je Einsteina da zanemari svoje pacifističke nazore i pridoda svoj autoritet pismu upućenom predsjedniku Rooseveltu u kojem se tražilo da Sjedinjene Američke Države započnu program nuklearnih istraživanja.



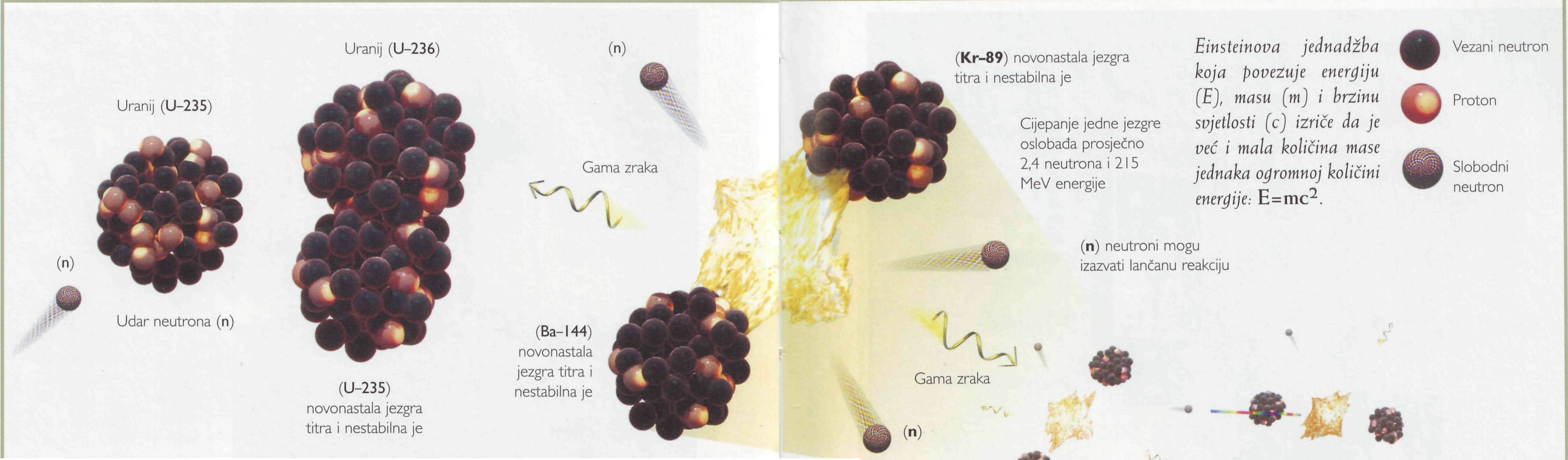
Iz toga je nastao projekt Manhattan, odnosno bombe koje su eksplodirale nad Hirošimom i Nagasakijem 1945. Neki ljudi su okrivili Einsteina zbog nuklearne bombe, zato što je on bio taj koji je otkrio vezu između mase i energije; ali to je isto kao optužiti Newtona za padove zrakoplova zato što je otkrio gravitaciju. Einstein nije uzeo nikakvog udjela u projektu Manhattan, a bacanje atomskih bombi ga je užasnulo.

Nakon kapitalnih radova iz 1905., Einsteinu je rastao znanstveni ugled. Međutim, tek 1909. ponuđeno mu je mjesto na Sveučilištu u Zurichu. Dvije godine kasnije prešao je na Njemačko sveučilište u Pragu, ali se vratio u Zurich 1912., ovoga puta na ETH. Unatoč antisemitizmu koji je bio rasprostranjen u dobrom dijelu Europe, čak i na sveučilištima, on je sada postao akademska zvijezda. Dobio je ponude iz Beča i Utrechta, ali prihvatio je položaj istraživača pri Pruskoj akademiji znanosti u Berlinu, zato što ga je to oslobađalo obveza da predaje. Preselio se u Berlin travnja 1914., gdje su mu se uskoro pridružili supruga i dva sina.



EINSTBNOVO PROROČANSKO PISMO PREDSJEDNIKU ROOSEVELTU 1939.

"Tijekom posljednjih mjeseci, zahvaljujući radu Joliota u Francuskoj te Fermija i Szilarda u Americi, postalo je moguće izazvati nuklearnu lančanu reakciju u nekoj masi uranija, pri čemu nastaje ogromna količina energije i novih elemenata sličnih radiju. Čini se gotovo sigurnim da se ovo može postići u neposrednoj budućnosti.
Ova nova pojava dovela bi i do stvaranja bombi, a moguće je - premda znatno manje sigurno - da bi mogle nastati i izuzetno jake bombe nove vrste"



LANČANA REAKCIJA

Neutron proizašao iz prethodnog cijepanja (fisije) U-235 udara u drugu jezgru. To izaziva njegovo cijepanje, čime počinje lančana reakcija sve novih i novih sudara i cijepanja.
Ako se reakcija samostalno može nastaviti, tada se naziva "kritičnom", a za to potrebna masa U-235 zove se "kritična masa".

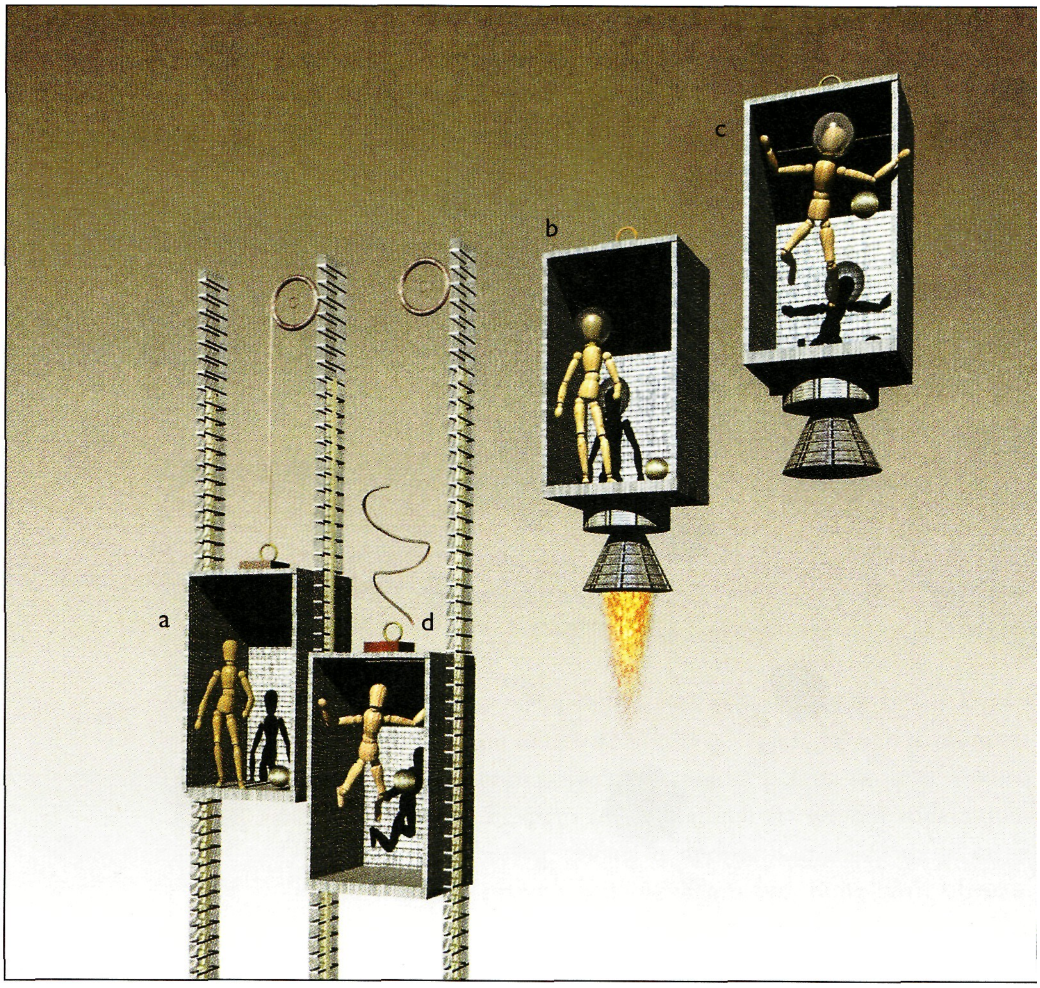
(IL. 1.8)
NUKLEARNA ENERGIJA VEZANJA

Jezgra se sastoji od protona i neutrona koje na okupu drži jaka sila. Ali masa jezgre uvijek je manja od zbroja pojedinačnih masa protona i neutrona koje je čine. Ova razlika u masi odgovara energiji koja drži jezgru na okupu. Ta energija vezanja može se izračunati iz Einsteinove jednadžbe: energija vezanja jezgre = Δmc^2, gdje je Δm razlika između mase jezgre i zbroja pojedinačnih masa dijelova jezgre.

Oslobađanje ove razlike mase u obliku energije stvara eksplozivnu snagu nuklearne bombe.

Brak mu je, međutim, već neko vrijeme bio u krizi i obitelj mu se uskoro vratila u Ziirich. Iako ih je on tamo povremeno posjećivao, supružnici su se ipak uskoro razveli. Einstein se kasnije oženio svojom rođakinjom Elsom koja je živjela u Berlinu. Činjenica da je ratne godine proveo kao razveden, bez obiteljskih obveza, bila je jedan od uvjeta koji su mu omogućili da to razdoblje bude na znanstvenom polju iznimno plodno.

Iako se teorija relativnosti dobro uklapala u zakone koji upravljaju elektricitetom i magnetizmom, ona nije bila suglasna s Newtonovim zakonom gravitacije. Prema ovom zakonu, ako se promijeni raspored materije u jednom području svemira, promjena gravitacijskog polja osjetit će se trenutačno svugdje drugdje u svemiru. Odavde ne samo što je proizlazilo da se mogu slati signali brži od svjetlosti (nešto što je relativnost zabranjivala) nego je, da bi uopće pojam "trenutačnosti" imao smisla, bilo nužno postojanje apsolutnog ili sveopćeg vremena, koje je relativnost ukinula u korist osobnog vremena.

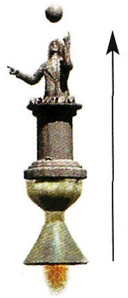


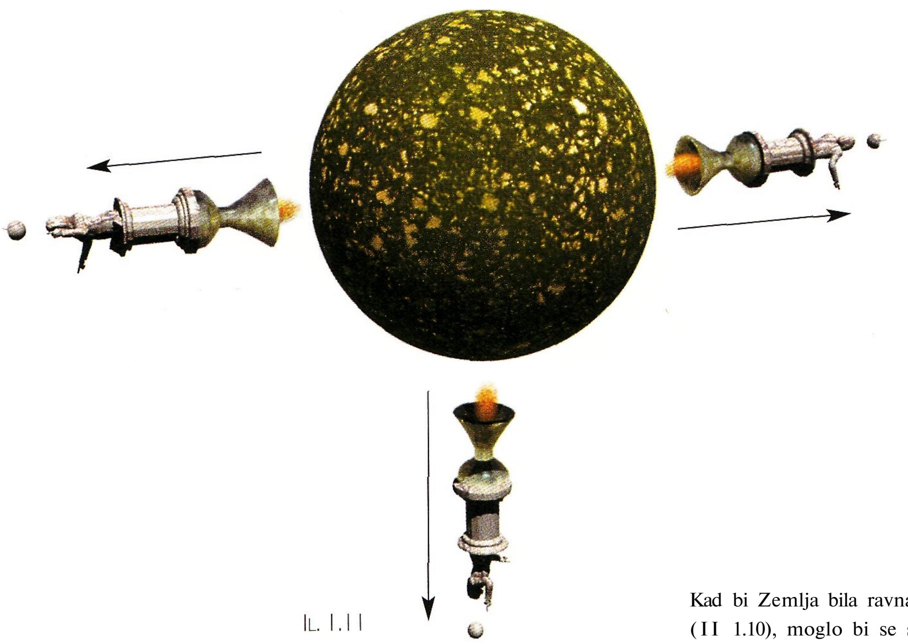
(IL 1.9)
Promatrač u kutiji ne može razlikovati nalazi li se u mirnom liftu na Zemlji (a) ili u svemirskoj raketi koja ubrzava (b).

Ako se pogon rakete isključi (c), bilo bi to isto kao da je lift u slobodnom padu prema dnu okna (d).

Einstein je bio svjestan ove poteškoće 1907. godine, ali tek nakon dolaska u Prag 1911. počeo se ozbiljno baviti problemom. Uvidio je da postoji bliska veza između ubrzanja i gravitacijskog polja. Netko tko se nalazi u zatvorenoj kutiji, kakva je lift, ne bi mogao reći nalazi li se ona u stanju mirovanja u Zemljinom gravitacijskom polju ili ubrzava pomoću rakete u slobodnom prostoru. (Ovo je, naravno, bilo prije *Zvjezdanih staza,* pa je Einstein stoga zamišljao ljude u liftovima.) Ali u liftu se ne može dugo ubrzavati odnosno slobodno padati prije negoli dođe do nesreće (il.1.9).

IL. 1.10



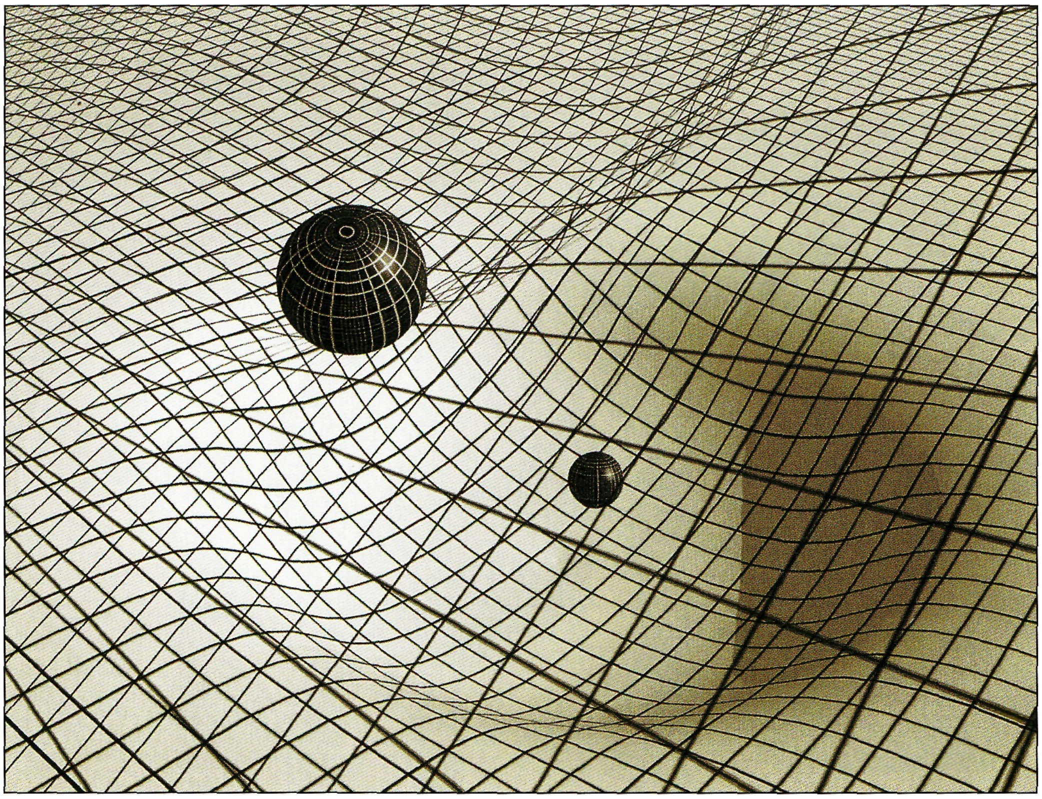


IL. 1.11

Kad bi Zemlja bila ravna (Il 1.10), moglo bi se s jednakim pravom reći da je ili jabuka pala na Nevvtonovu glavu zbog gravitacije ili se Zemlja i Newton ubrzano gibaju prema gore. Ova jednakost ne vrijedi kod Zemlje oblika lopte (IL 1.11) zato što bi se ljudi na suprotnim stranama svijeta međusobno udaljavali. Einstein je razriješio ovu poteškoću pretpostavkom da su prostor i vrijeme zakrivljeni.

Da je Zemlja ravna, moglo bi se reći da je jabuka pala Newtonu na glavu zbog djelovanja gravitacije, ali i zato što su Newton i površina Zemlje ubrzavali prema gore (il. 1.10). Ova istovjetnost ubrzanja i gravitacije nije, čini se, vrijedila kod okrugle Zemlje — ljudi na suprotnim krajevima svijeta trebalo bi ubrzavati u suprotnim smjerovima, ali i da ostaju na istoj međusobnoj udaljenosti (il. 1.11).

Međutim, nakon povratka u Zurich 1912. Einstein je u bljesku pameti uvidio da će ova istodobnost ostati na snazi ako je geometrija prostorvremena zakrivljena, a ne ravna, kao što se do tada smatralo.

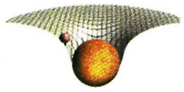


(IL.1.12)
ZAKRIVLJENO PROSTORVRIJEME

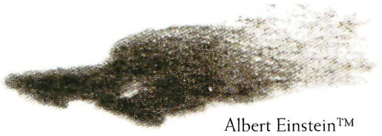
Ubrzanje i gravitacija mogu biti ekvivalentni samo ako neko masivno tijelo zakrivljuje prostorvrijeme, savijajući tako staze predmeta u svojoj blizini.

Njegova je ideja bila da će masa i energija zakriviti prostorvrijeme na način koji tek treba ustanoviti. Tijela kao što su jabuke ili planeti nastojat će se gibati pravocrtno kroz prostorvrijeme, ali njihove staze izgledale bi savijene djelovanjem gravitacijskog polja, jer je prostorvrijeme zakrivljeno (il. 1.12).

Uz pomoć prijatelja Marcela Grossmanna, Einstein se uputio u apstraktnu matematičku teoriju zakrivljenih prostora i površina koju je ranije bio razvio Georg Friedrich Riemann. Već je Riemann razmišljao o tome može li se njegova geometrija primijeniti na stvarni svijet. No on je pritom imao u vidu samo trodimenzioni *prostor* kao zakrivljen. Einstein je, međutim, upotrijebio Riemannov matematički formalizam da bi opisao četverodimenziono *prostorvrijeme*. On i Grossmann napisali su zajednički rad 1913., u kojem su izložili zamisao da je ono što podrazumijevamo pod gravitacijskim silama samo izraz činjenice da je prostorvrijeme zakrivljeno.



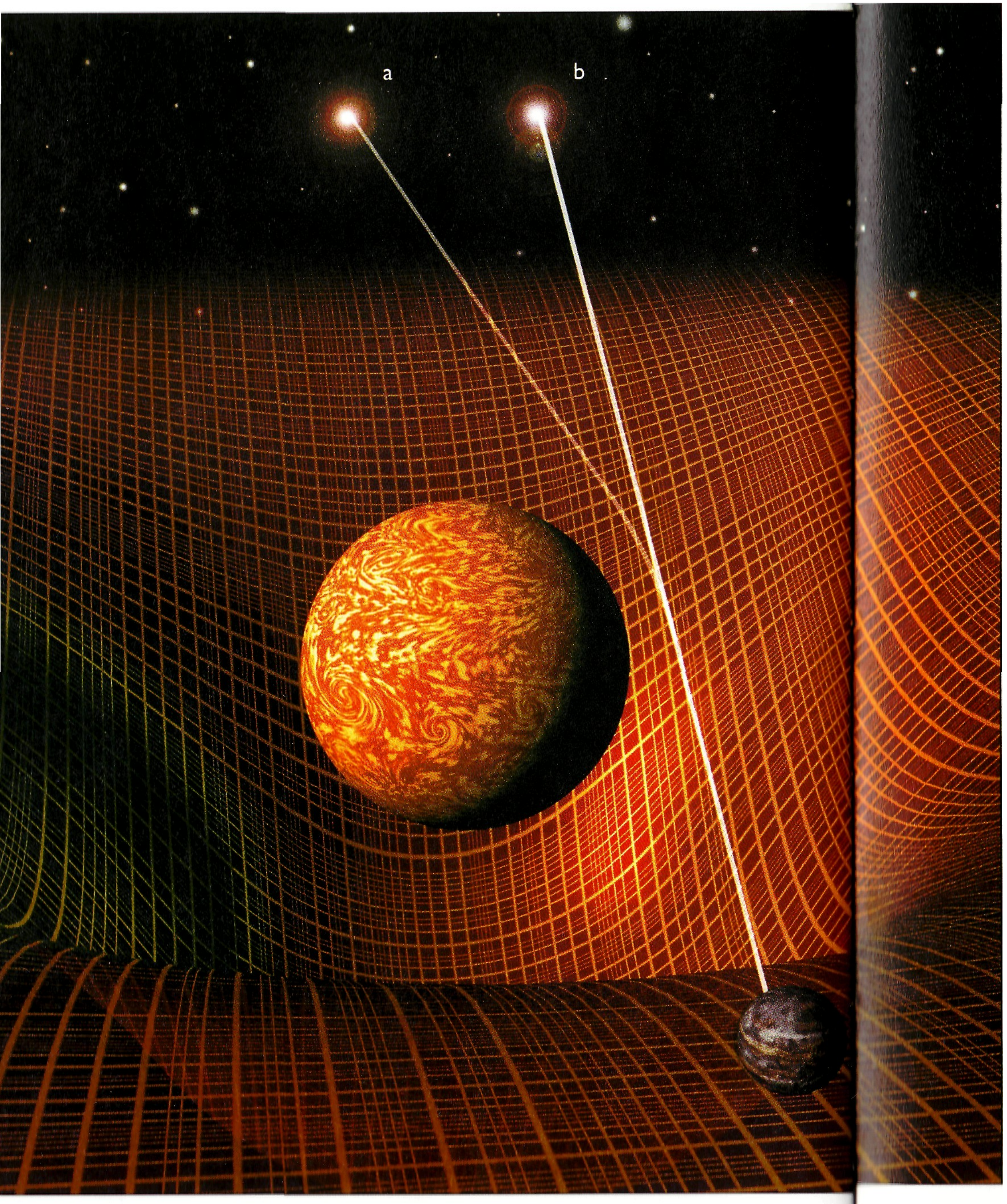
Međutim, zbog jedne Einsteinove pogreške (on, dakako, nije bio nepogrešiv), nisu uspjeli doći do jednadžba koje dovode u vezu zakrivljenost prostora s masom i energijom u njemu. Einstein je nastavio raditi na ovom problemu u Berlinu, neometan obiteljskim obvezama, kao ni, u najvećoj mjeri, ratnim prilikama, sve dok konačno nije došao do ispravnih jednadžbi u studenome 1915. Vodio je raspravu o svojoj zamisli s matematičarom Davidom Hilbertom tijekom posjeta Sveučilištu u Gottingenu ljeti 1915, a Hilbert je nezavisno došao do istih jednadžbi nekoliko dana prije Einsteina. Kako je, međutim, sam Hilbert priznao, nova teorija bila je zasluga Einsteina. Njegova je bila zamisao da se gravitacija i zakrivljenost prostorvremena dovedu u vezu. Činjenica da su se ovakve znanstvene rasprave mogle bez poteškoća voditi i u ratno vrijeme najbolje svjedoči o civiliziranosti Njemačke iz toga razdoblja. Ovo je u oštroj opreci s nacističkom erom koja će zavladati nešto kasnije.



Albert Einstein™

Low

Nova teorija o zakrivljenom prostorvremenu nazvana je općom teorijom relativnosti, kako bi se razlikovala od teorije bez gravitacije iz 1905., koja je sada poznata kao



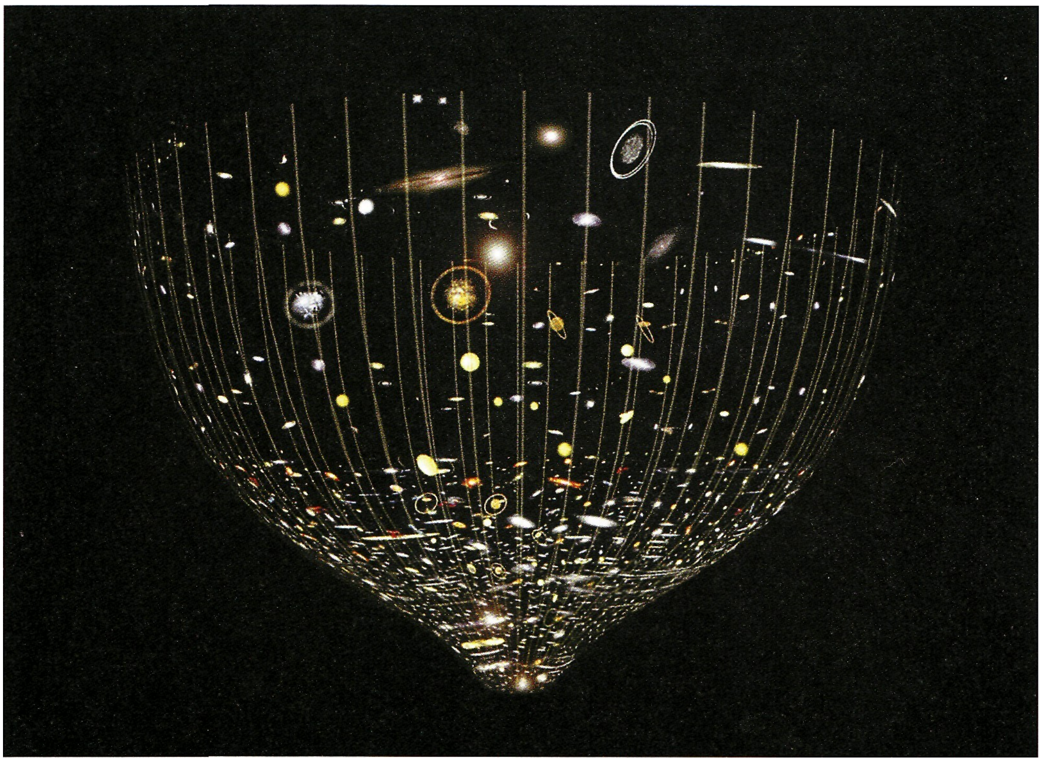
(IL. 1.13) SAVIJANJE ZRAKE SVJETLOSTI

Svjetlost koja prolazi u blizini Sunca biva skrenuta masom kojom Sunce zakrivljuje prostorvrijeme (a). Ovo izaziva malen, ali izmjerljiv, pomak prividnog položaja zvijezde viđene sa Zemlje (b). Pojava se može primijetiti za vrijeme totalne pomrčine Sunca.

specijalna teorija relativnosti. Teorija je potvrđena na spektakularan način 1919. godine kada je jedna britanska ekspedicija u zapadnu Afriku zabilježila teorijom predviđeno savijanje svjetlosti jedne zvijezde koja se nalazila blizu Sunca za vrijeme pomrčine (il. 1.13). Bio je to neposredan dokaz da su prostor i vrijeme zakrivljeni, što je dovelo do najveće promjene našeg viđenja svemira —još od vremena kada je Euklid napisao svoje *Elemente* oko 300. godine p. n. e.

Einsteinova opća teorija relativnosti preoblikovala je prostor i vrijeme iz pasivne pozadine, na kojoj se događaju zbivanja, u aktivnog sudionika dinamike svemira. Ovo je otvorilo veliki problem kojim će se fizika baviti i u dvadeset prvom stoljeću. Svemir je pun materije, a materija zakrivljuje prostorvrijeme na takav način da tijela padaju jedna prema drugima. Einstein je ustanovio da iz njegovih jednadžbi ne slijedi rješenje koje bi opisalo statični svemir, nepromjenjiv u vremenu. Umjesto da odustane od takvog vječno nepromjenjivog svemira, u koji su on i većina drugih ljudi vjerovali, preinačio je jednadžbe, uvevši u njih jednu veličinu koja je nazvana kozmološkom konstantom. Ona je zakrivila svemir u suprotnom smjeru, tako da su se sad tijela u njemu mogla međusobno udaljavati. Ovo odbojno djelovanje kozmološke konstante javljalo se kao protuteža privlačnom djelovanju materije, iz čega je slijedilo statično rješenje za svemir. Bila je to jedna od najvećih propuštenih prilika u teorijskoj fizici. Da se Einstein držao prvobitnih jednadžba, mogao je predvidjeti da se svemir mora ili širiti ili stezati. Mogućnost da se svemir mijenja prvi put je ozbiljno uzeta u obzir kada su, tijekom dvadesetih godina dvadesetog stoljeća, obavljena promatranja teleskopom promjera 2,5 metra na Zvjezdarnici Mount Wilson.

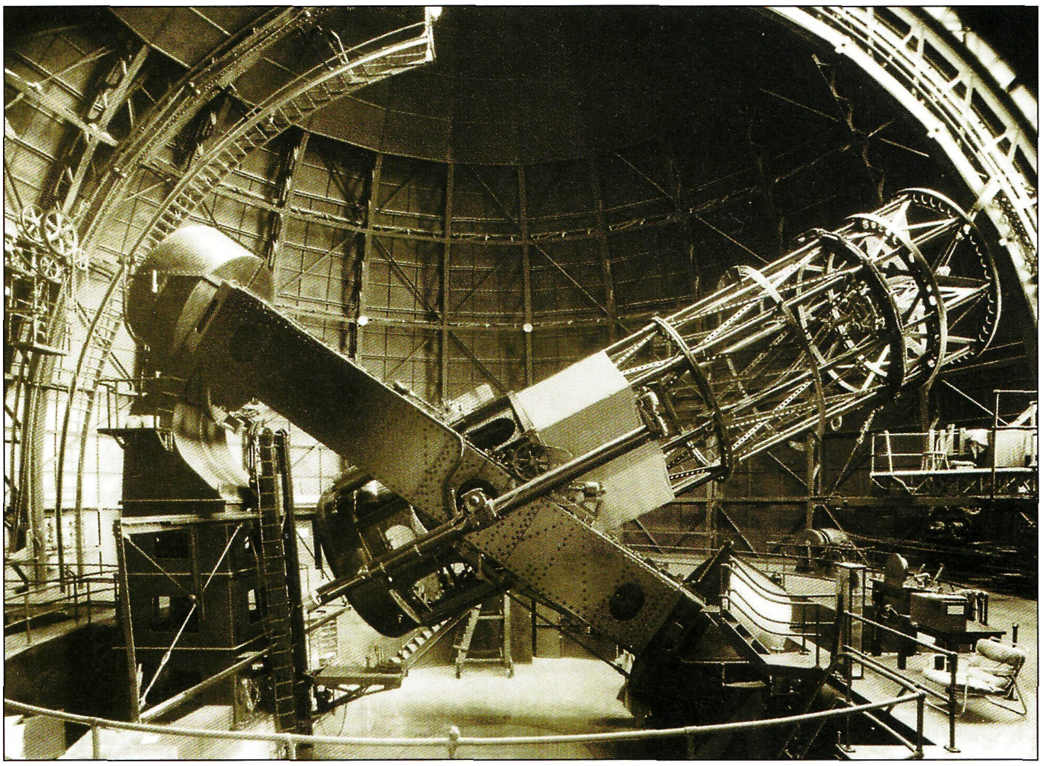
Ova promatranja otkrila su da što je neka galaktika udaljenija od naše, to se brže udaljava od nas. Svemir se širi, pri čemu se udaljenost između bilo koje dvije galaktike postojano povećava tijekom vremena (il. 1.14, stranica 22). Ovo otkriće uklonilo je potrebu za kozmološkom konstantom, kako bi se dobilo statično rješenje za svemir. Einstein je kasnije nazvao kozmološku konstantu najvećom zabludom svog života. Sada se, međutim, čini da to možda i nije bila zabluda: najnovija promatranja, o kojima će kasnije biti riječ, upućuju na to da možda stvarno postoji neka mala **kozmološka** konstanta.



(IL 1.14)
Promatranje galaktika upućuje na zaključak da se svemir širi: udaljenost između bilo koje dvije galaktike se povećava.

Opća teorija relativnosti potpuno je promijenila raspravu o nastanku i sudbini svemira. Statičan svemir mogao je postojati zauvijek ili je mogao nastati u svom sadašnjem obliku u nekom trenutku u prošlosti. Međutim, ako se galaktike sada međusobno udaljavaju, to onda znači da su se u prošlosti nalazile bliže jedna drugoj. Prije otprilike petnaest milijarda godina one su sve bile na istom mjestu, gdje je gustoća bila ogromna. Katolički svećenik Georges Lemaitre, koji je prvi došao na zamisao o nastanku svemira činom što ga danas zovemo Veliki prasak, nazvao je ovo stanje "praiskonskim atomom".

Čini se da Einstein nikada nije shvatio ozbiljno zamisao o Velikom prasku. Smatrao je da bi jednostavan model svemira, koji se jednoliko širi, zakazao ako bi se pratilo gibanje galaktika unatrag kroz vrijeme, kao i da bi male bočne brzine galaktika dovele do toga da se one ne sudare. Mislio je da je svemir možda imao prethodnu fazu sažimanja, koja se pretvorila u sadašnje širenje pri prilično skromnoj gustoći. Sada nam je, međutim, poznato da je gustoća morala biti ba-



Hookerov teleskop od 2,5 metra Zvjezdarnice Mount Wilson.

rem jednu tonu po centimetru kubičnom, a temperatura od deset milijarda stupnjeva, kako bi nuklearne reakcije u ranom svemiru proizvele onu količinu lakih elemenata koju zapažamo oko nas. Uz to, promatranja pozadinskog zračenja pokazuju da je ta gustoća doista jednom bila veća od 100 milijarda bilijuna bilijuna bilijuna bilijuna bilijuna (jedinica iza koje ide niz od 71 nule) tona po centimetru kubičnom. Sada također znamo da Einsteinova opća teorija relativnosti ne dopušta da svemir prijeđe iz faze sažimanja u sadašnje širenje. U drugom poglavlju bit će riječi o tome kako smo Roger Penrose i ja uspjeli dokazati da opća teorija relativnosti predviđa nastanak svemira iz Velikog praska. Prema tome, iz Einsteinove teorije proizlazi da vrijeme ima početak, iako se njemu to nikada nije sviđalo.

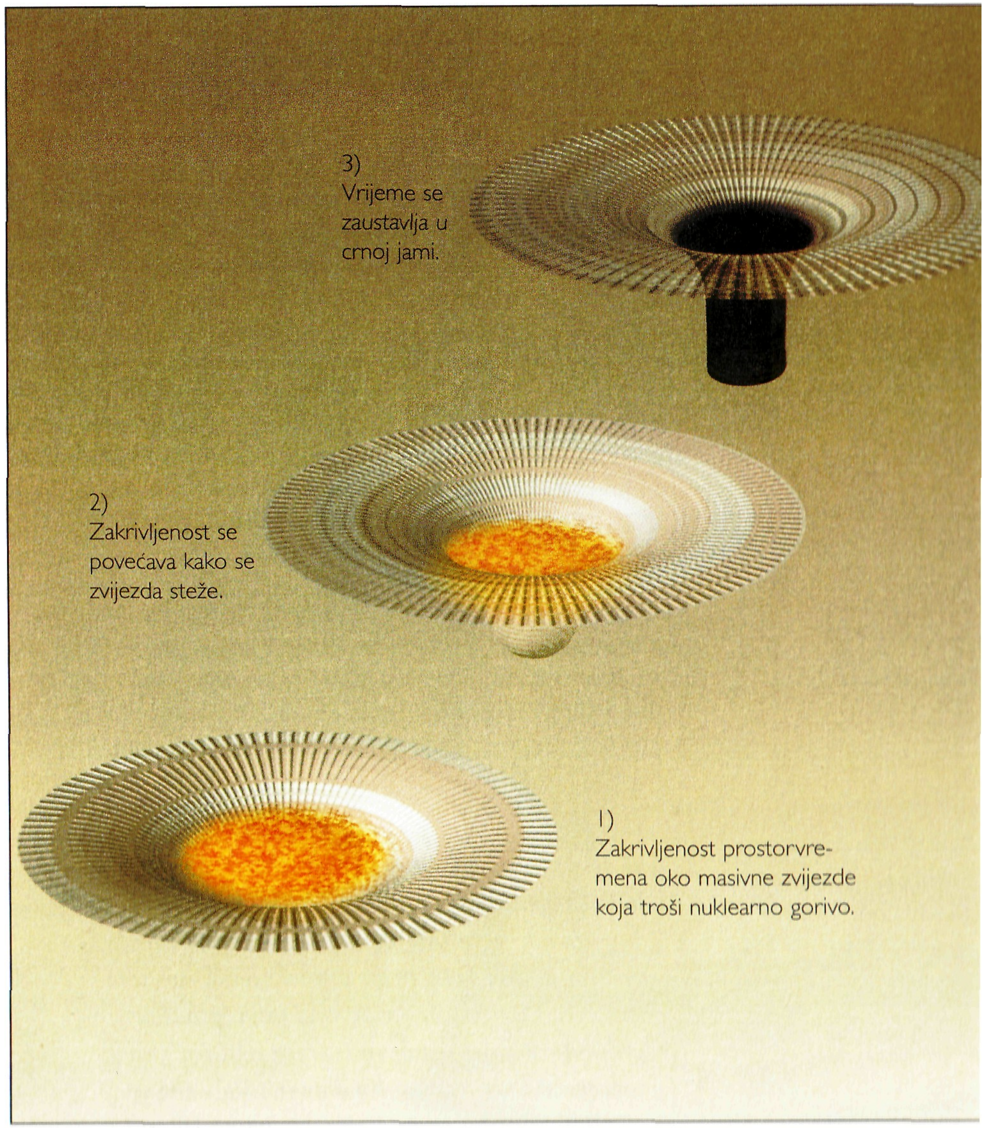
Einstein je još manje bio voljan priznati da teorija relativnosti predviđa da će se vrijeme zaustaviti za masivne zvijezde kada stignu do kraja svoga života i više ne stvaraju dovoljno topline koja bi stajala kao protuteža njihovoj gravitaciji, koja ih nastoji sabiti. Bio je mišljenja da

će se **te zvijezde** smiriti u nekom završnom stanju, ali mi sada znamo da nema nikakvog postojanog završnog stanja za zvijezde čija je masa dvostruko veća od Sunca. Takve zvijezde nastavit će se stezati sve dok ne postanu crne jame: područja prostorvremena koja su toliko zakrivljena da ih ni svjetlost ne može napustiti (il. 1.15).

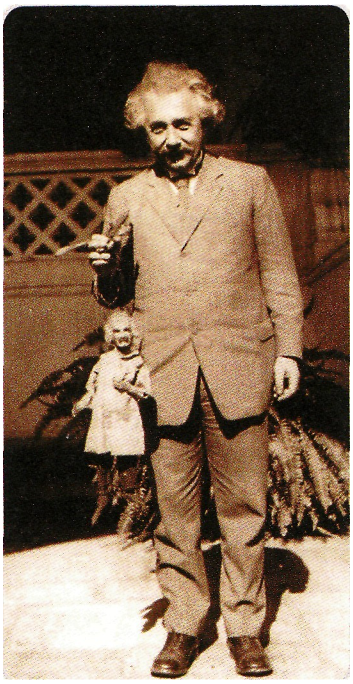
Penrose i ja pokazali smo da opća teorija relativnosti predviđa zaustavljanje vremena unutar crne jame, kako za tu zvijezdu tako i za svakog nesretnog astronauta koji bi u nju upao. Ali i početak i kraj vremena bili bi mjesta na kojima jednadžbe teorije relativnosti ne bi više vrijedile. Prema tome, ova teorija ne može predvidjeti ono što bi trebalo izaći iz Velikog praska. Neki u tome vide znak slobode Boga da započne svemir na bilo koji način koji poželi, dok drugi (medu koje i ja spadam) smatraju da bi početkom svemira trebali upravljati isti zakoni koji vrijede i u drugim vremenima. Ostvarili smo izvjestan napredak prema tome cilju, kao što će biti opisano u trećem poglavlju, ali još ne razumijemo potpuno nastanak svemira.

Razlog zbog koga je opća teorija relativnosti zakazala u Velikom prasku je taj što ona nije u suglasju s kvantnom teorijom, drugom značajnom znanstvenom revolucijom iz ranog dvadesetog stoljeća. Prvi korak prema kvantnoj teoriji načinjen je 1900. godine, kada je Max Planck otkrio da se zračenje tijela u stanju crvenog usijanja može objasniti jedino ako se svjetlost koja se emitira ili apsorbira javlja u diskretnim paketima koji su nazvani kvanti. U jednom od svojih epohalnih radova, napisanom 1905. Einstein je pokazao da se Planckovom kvantnom hipotezom može objasniti ono što je on nazvao fotoelektričnim efektom, proces pri kojem neki metali, kad ih se osvijetli, oslobađaju elektrone. Ovo je osnova suvremenih svjetlosnih detektora i televizijskih kamera i baš za taj rad Einstein je dobio Nobelovu nagradu.

Einstein se nastavio baviti kvantnom fizikom tijekom dvadesetih godina, ali vrlo su ga uznemirili radovi Wernera Heisenberga u Kopenhagenu, Paula Diraca u Cambridgeu i Erwina Schrodingera u Ziirichu, koji su razvili novu sliku stvarnosti, nazvanu kvantnom mehanikom. Cestice više nisu imale određeni položaj i brzinu. Umjesto toga, što bi se točnije odredio položaj neke čestice, to se manje točno mogla odrediti njena brzina, i obrnuto, liinstein je bio užasnut ovim elementom slučajnosti, nepredvidivosti u **temelju** prirode, i nikada nije potpuno prihvatio kvantnu **mehaniku. Ono** što **je**



(IL. 1.15, nasuprot) Kad masivna zvijezda potroši svoje nuklearno gorivo, gubi toplinu i urušava se u sebe. Zakrivljenost prostorvremena postaje tada toliko velika da će nastati crna jama s koje svjetlost ne može pobjeći. Unutar crne jame vrijeme se zaustavlja.



Albert Einstein drži u ruci lutka njegova obličja, ubrzo nakon što se za stalno nastanio u Americi.

o tome osjećao najbolje je izložio u svojoj poznatoj izjavi: "Bog se ne kocka." Većina drugih fizičara, međutim, prihvatila je nove kvantne zakone, jer su pružali objašnjenja za cijeli raspon ranije neobjašnjivih pojava te se izvrsno slagali s promatranjima. Ti zakoni su temelj suvremenog razvoja u kemiji, molekulnoj biologiji i elektronici, kao i temelj tehnologije koja je preoblikovala svijet posljednjih pedeset godina.

U prosincu 1932., svjestan da će nacisti doći na vlast, Einstein je napustio Njemačku, provevši zatim posljednjih dvadesetak godina života u Institutu za napredne studije u Princetonu, u New Jersevju.

U Njemačkoj su nacisti pokrenuli kampanju protiv "židovske znanosti" i mnogih njemačkih znanstvenika židovskog podrijetla; bio je to jedan od razloga zbog kojih Njemačka nije uspjela napraviti nuklearnu bombu. Einstein i relativnost bili su glavne mete u ovoj kampanji. Kada je doznao za objavljivanje knjige pod naslovom *Stotinu autora protiv Einsteina,* on je primijetio: "Zašto stotinu? Da nisam u pravu, i jedan bi bio dovoljan." Nakon drugog svjetskog rata, založio se kod saveznika da se osnuje svjetska vlada koja bi imala nadzor nad nuklearnim oružjem. Godine 1948., ponuđen mu je položaj predsjednika novoosnovanog Izraela, ali on je ponudu odbio. Jednom prigodom je rekao: "Politika je za trenutak, dok je jedna jednadžba za vječnost." Einsteinove jednadžbe opće teorije relativnosti njegov su najbolji epitaf i spomenik. One će trajati koliko i sam svemir.

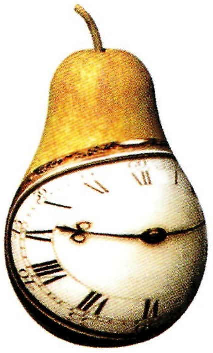
Svijet se promijenio tijekom posljednjih stotinu godina više nego u bilo kojem drugom stoljeću. Uzrok tome nisu bile nove političke ili gospodarske doktrine, već razvoj tehnike koji je omogućen napretkom fundamentalnih znanosti. A tko bolje simbolizira taj napredak od Alberta Einsteina?

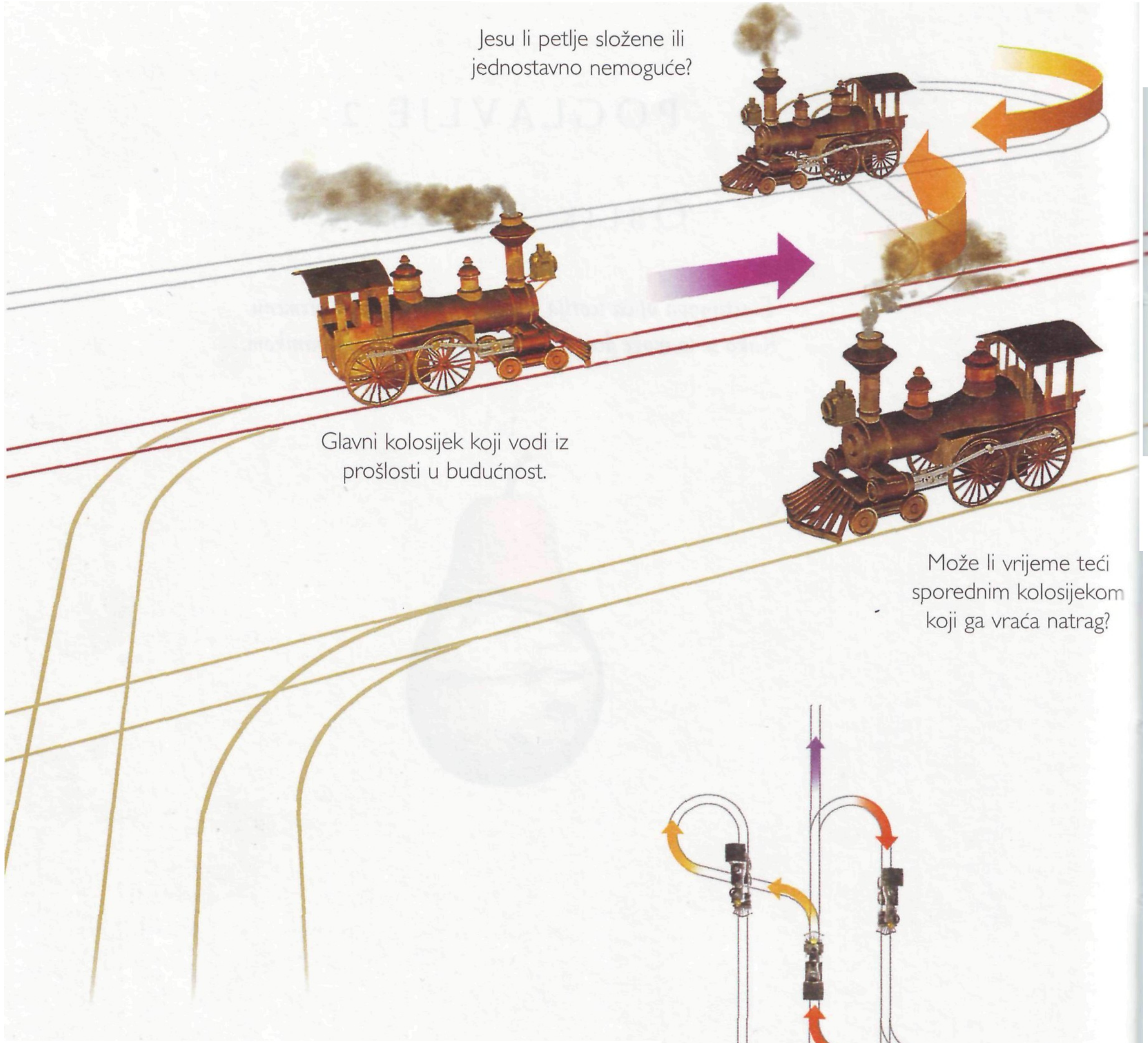
Albert Einstein™

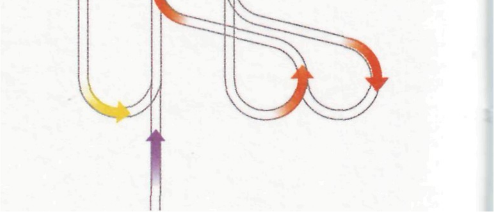
POGLAVLJE *2*

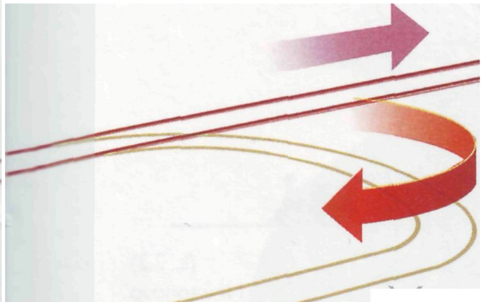
OBLIK VREMENA

Einsteinova opća teorija relativnosti daje oblik vremenu.
Kako se to može dovesti u sklad s *kvantnom mehanikom.*









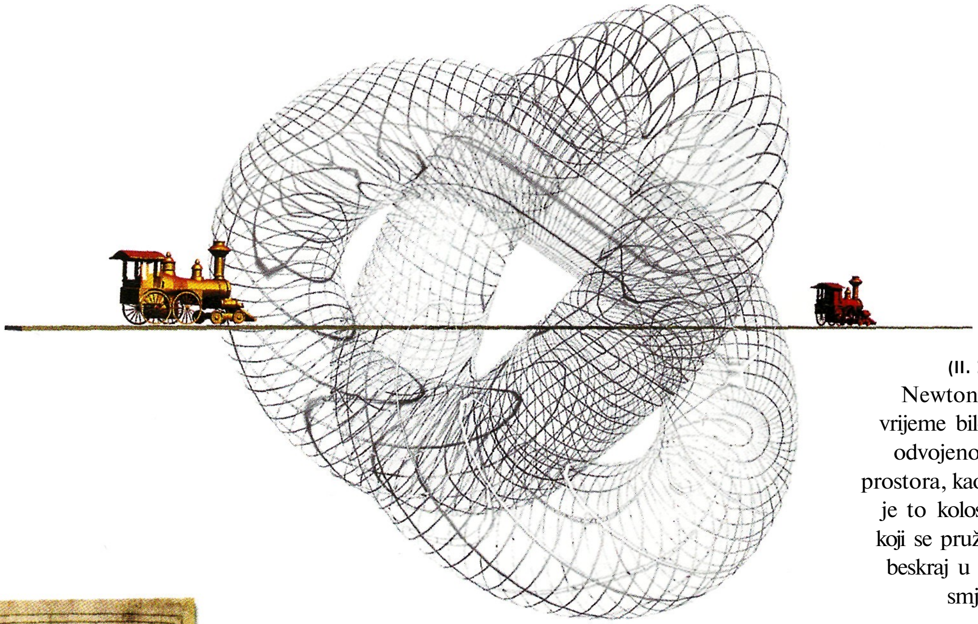
(IL 2.1) MODEL VREMENA KAO ŽELJEZNIČKE PRUGE

Postoji li samo glavni kolosijek kojim se ide u jednom smjeru — prema budućnosti — ili se s njega odvaja petlja koja se ponovno spaja s glavnim kolosijekom negdje ranije?

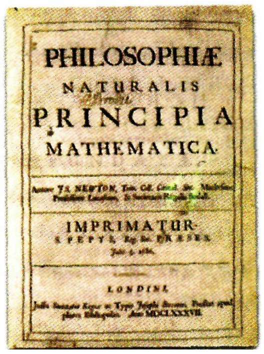
ŠTO JE VRIJEME? JE LI TO RIJEKA ŠTO VJEČNO TEČE I ODNOSI SVE naše snove, kao što kaže stara pjesma? Ili je to željeznička tračnica? Možda ono ima petlje i grananja, tako da, uvjereni da idete naprijed, stižete do neke postaje u kojoj ste već bili (il. 2.1).

Pisac iz devetnaestog stoljeća Charles Lamb napisao je: "Ništa me ne zbunjuje koliko vrijeme i prostor. Ali i ništa me *manje* ne brine od vremena i prostora, zato što uopće ne razmišljam o njima." Većina nas najčešće ne obraća pozornost na vrijeme i prostor, ma što se pod tim podrazumijevalo; ali svi se ipak ponekad zapitamo što je vrijeme, kako je počelo i kuda nas vodi.

Svaka razumna znanstvena teorija, bilo o vremenu ili o ma kojoj drugoj veličini, trebala bi se, po mome mišljenju, temeljiti na pozitivističkom pristupu, što su ga razvili Karl Popper i drugi. Suglasno ovoj školi mišljenja, neka znanstvena teorija je matematički model koji opisuje i kodificira promatranja što ih provodimo. Dobra teorija opisat će veliki raspon pojava na temelju nekoliko jednostavnih postulata i pružit će jasna predviđanja koja se mogu provjeriti. Ako se predviđanja slažu s nalazima promatranja, teorija preživljava provjeru, premda se za nju nikada ne može dokazati da je točna. S druge strane, ako nalazi promatranja nisu u suglasnosti s predviđanjima, teorija se mora odbaciti ili preinačiti. (Tako bi barem trebalo biti. U praksi, međutim, ponekad se dovodi u pitanje točnost promatranja, odnosno pouzdanost i moralnost onih koji su ih proveli.) Ako se zauzme pozitivističko gledište, što ja činim, ne može se reći što je, zapravo, vrijeme. Samo je moguće opisati ono za što je ustanovljeno da je vrlo dobar matematički model vremena, a potom navesti koja predviđanja iz njega proizlaze.

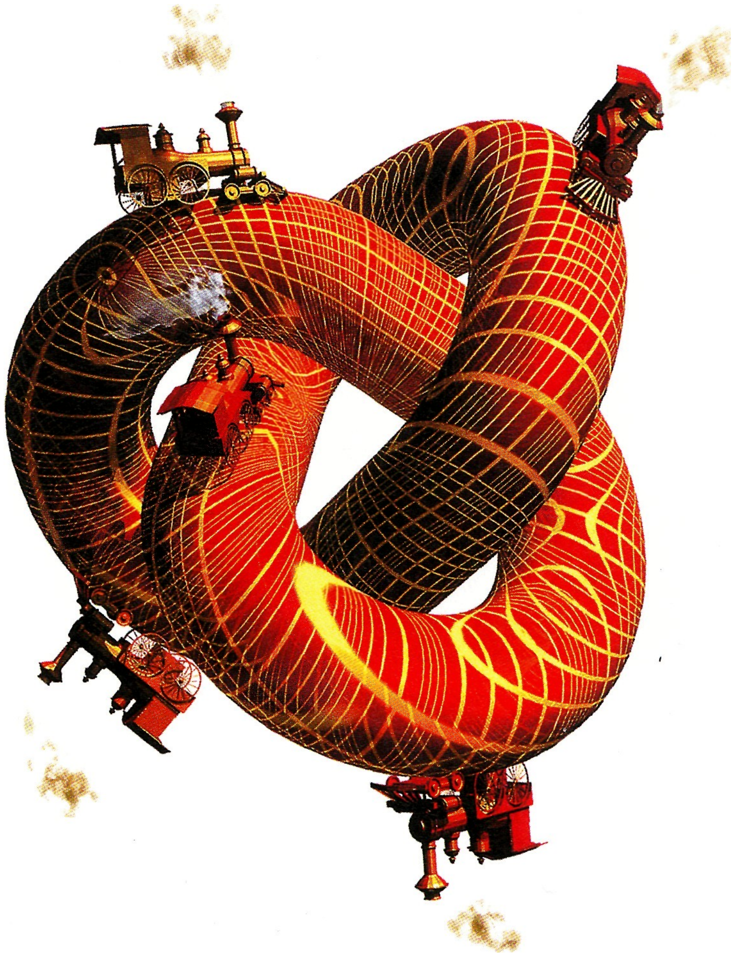


(Il. 2.2) Newtonovo vrijeme bilo je odvojeno od prostora, kao da je to kolosijek koji se pruža u beskraj u oba smjera.



Isaac Newton objavio je svoj matematički model vremena i prostora prije više od tri stotine godina.

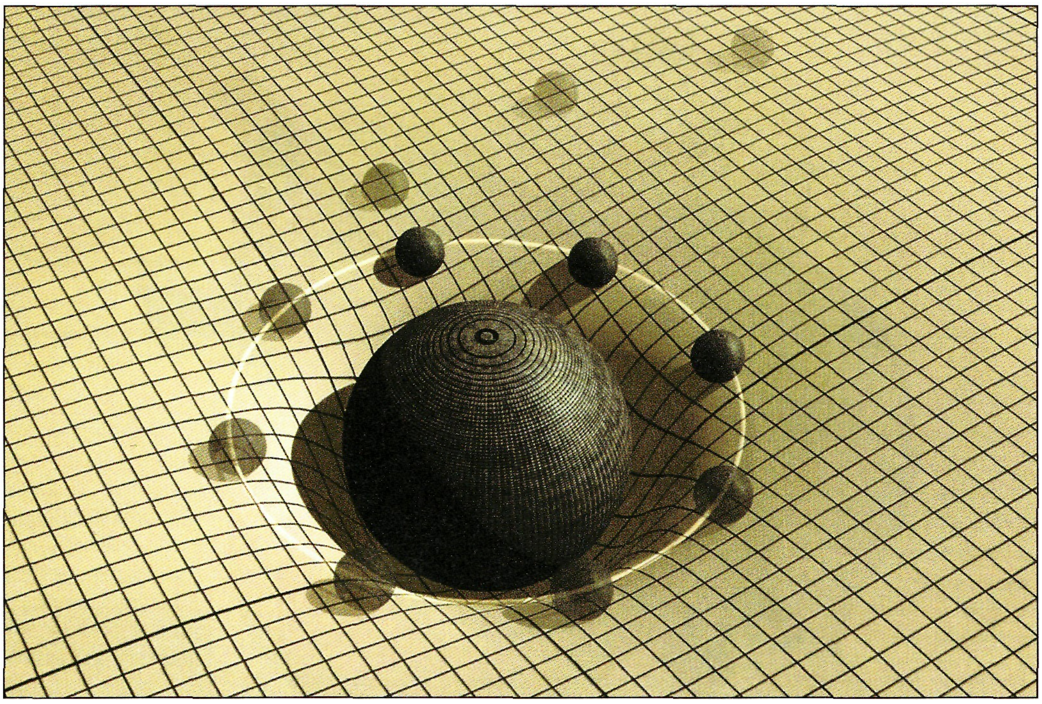
Isaac Newton dao nam je prvi matematički model vremena i prostora u svom djelu *Principia Matbematica*, objavljenom 1687. Newton je držao Lucasovu katedru na Cambridgeu, na kojoj ja sada sjedim, premda ona u to vrijeme nije bila električna. (Neprevediva igra riječi: na engleskom se istom riječju *"chair"* naziva i sveučilišna katedra i stolica - Hawkingova invalidska; *prim. prev.)* U Newtonovom modelu, vrijeme i prostor su pozadina na kojoj su se odigravali događaji, ali koja na njih nije imala utjecaj. Vrijeme je bilo razdvojeno od prostora i smatralo se da je poput željezničke tračnice koja se u oba smjera pruža u beskraj (il. 2.2). Za vrijeme se vjerovalo da je vječno, da je postojalo i da će postojati zauvijek. Pa ipak, većina ljudi mislila je da je fizički svemir stvoren u manje-više svom sadašnjem obliku prije samo nekoliko tisuća godina. Ovo je zadavalo glavobolje filozofima poput Immanuela Kanta. Ako je svemir doista stvoren, zašto je bilo neophodno beskrajno čekati prije no što je do toga došlo? S druge strane, ako je svemir oduvijek postojao, zašto se onda sve što se već trebalo odigrati nije već dogodilo, što bi značilo da je povijest gotova? Zašto, na primjer, svemir nije već postigao stanje toplinske ravnoteže, stanje kada je sve na istoj temperaturi?



(IL 2,3) OBLIK I SMJER VREMENA

Einsteinova teorija relativnosti, koju potvrđuje mnogo pokusa, pokazuje da su prostor i vrijeme nerazdvojivo povezani.

Ne može se zakriviti prostor bez utjecaja na vrijeme. Vrijeme, dakle, ima oblik. Izgleda, međutim, da je ono također i jednosmjerno, kao što to pokazuju lokomotive na ilustraciji.



(Il 2.4)
ANALOGIJA S GUMENOM PLAHTOM

Velika lopta u sredini predstavlja neko masivno tijelo kakvo je zvijezda.
Njegova težina savija dijelove plahte u svojoj blizini. Male lopte koje se kotrljaju plahtom skreću zbog oblika površine plahte s pravca i počnu kružiti oko velike lopte, kao što planeti u gravitacijskom polju neke zvijezde kruže oko nje.

Kant je nazvao ovaj problem "antinomija čistog uma", zato što je izgledao kao logična proturječnost; on nije imao rješenje. Ali to je bila proturječnost samo u okviru Newtonovog matematičkog modela, gdje je vrijeme bilo predstavljeno beskrajnim pravcem, nezavisnim od onoga što se zbiva u svemiru. Kao što smo, međutim, vidjeli u prvom poglavlju, Einstein je 1915. izložio potpuno novi matematički model: opću teoriju relativnosti. Kasnije su provedena izvjesna dograđivanja, ali naš model vremena i prostora i dalje se temelji na Einsteinovim zamislima. U ovom i sljedećim poglavljima bit će riječi o razvoju ideja nakon Einsteinovog revolucionarnog rada. To je priča okrunjena uspjehom, zahvaljujući radu velikog broja ljudi, a ja se ponosim svojim skromnim doprinosom u tome.

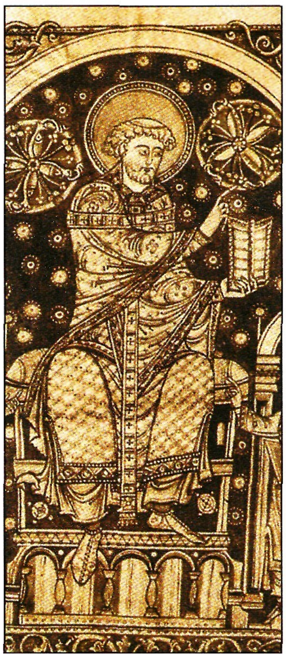
Opća teorija relativnosti povezuje dimenziju vremena sa tri dimenzije prostora u takozvano prostorvrijeme (vidjeti stranicu 33, il. 2.3). Teorija obuhvaća i djelovanje gravitacije, time što tvrdi da raspored materije i energije u svemiru zakrivljuje i izobličuje prostorvrijeme, tako da ono nije ravno. Tijela u prostorvremenu nastoje se gibati pravocrtno, ali kako je samo prostorvrijeme za-

krivljeno, zakrivljene su i njihove staze. Tijela se gibaju kao da na njih djeluje gravitacijsko polje.

Evo jedne približne analogije koju ne treba doslovno shvatiti. Zamislite jednu gumenu plahtu. Na nju stavite veliku loptu koja predstavlja Sunce. Težina lopte rastegnut će nadolje plahtu pa će dio plahte oko lopte-Sunca biti zakrivljen. Ako se sada zakotrljaju po plahti kuglice pokraj lopte, one neće ići pravocrtno uz nju već će zakrenuti oko lopte, poput planeta što kruže oko Sunca (il. 2.4).

Analogija je nepotpuna zato što je u njoj zakrivljen samo dvodimenzioni presjek prostora (površina gumene plahte), a i vrijeme je ostavljeno po strani, kao što je to u Newtonovoj teoriji. U teoriji relativnosti, međutim, kojoj u prilog ide veliki broj provedenih pokusa, vrijeme i prostor su nerazdvojivo povezani. Ne može se zakriviti prostor bez utjecaja na vrijeme. Shodno tome, vrijeme također ima oblik. Deformiranjem prostora i vremena, opća relativnost mijenja ih iz pasivne pozadine spram koje se odigravaju događaji u aktivnog, dinamičnog sudionika zbivanja. Prema Newtonovoj teoriji, u kojoj vrijeme postoji nezavisno od svega drugog, moglo bi se postaviti sljedeće pitanje: što je radio Bog prije negoli je stvorio svemir? Sveti Augustin rekao je tim povodom da se ne treba šaliti s ovim stvarima - poput biskupa Ushera koji je smatrao da je "Bog pripremao pakao za sve koji si razbijaju glavu takvim pitanjem". Riječ je o ozbiljnom pitanju koje je zaokupljalo ljude tijekom stoljeća. Prema svetom Augustinu, prije negoli je Bog stvorio nebo i zemlju, on nije radio ništa. U stvari, ovo je vrlo blisko suvremenim zamislima.

U općoj teoriji relativnosti, s druge strane, vrijeme i prostor ne postoje nezavisno o svemiru ili jedno od drugog. Oni su određeni mjerenjima unutar svemira, kao što je broj vibracija kvarcnog kristala u uri ili dužina ravnala. Sasvim je pojmljivo da vrijeme određeno na ovaj način, unutar svemira, ima neku minimalnu ili maksimalnu vrijednost — drugim riječima, početak ili kraj. Ne bi imalo smisla pitati što se dogodilo prije početka ili nakon kraja, zato što su takva vremena neodrediva.



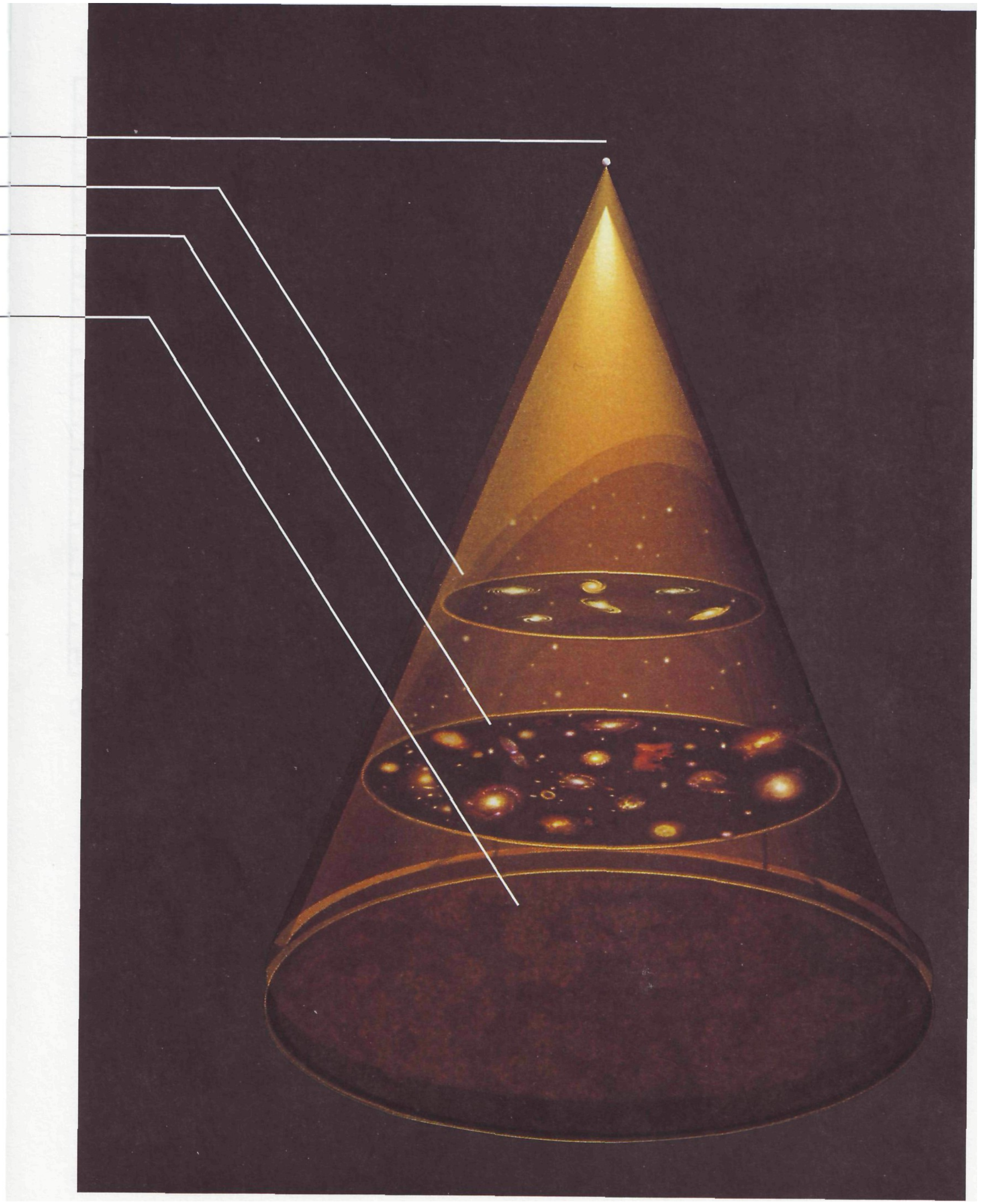
Sveti Augustin, kršćanski mislilac iz *petog stoljeća, koji je smatrao da vrijeme nije postojalo prije početka svijeta.*

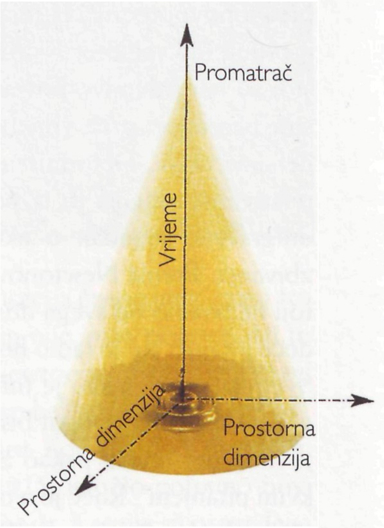
Stranica iz djela De Civitate Dei, *dvanaesto stoljeće. Biblioteca Laurenziana, Firenca.*

Očigledno je bilo važno ustanoviti *predviđa li* matematički model teorije relativnosti da svemir, odnosno samo vrijeme, ima početak ili kraj. Prema jednoj rasprostranjenoj predrasudi među teorijskim fizičarima, računajući tu i samog Einsteina, vrijeme bi trebalo biti beskonačno u oba smjera. U protivnom, javila bi se neugodna pitanja o nastanku svemira, koja, kako izgleda, stoje izvan područja znanosti. Znalo se da postoje rješenja Einsteinovih jednadžba, u kojima vrijeme ima početak i kraj, ali sva su ona bila vrlo posebna, s velikim simetrijama. Smatralo se da će kod nekog stvarnog tijela koje kolabira pod djelovanjem vlastite gravitacije, neki fizikalni mehanizmi — bilo da je to sve veći tlak kako se materija sve jače steže, bilo da će materija nakon početnog gibanja prema jednoj točki preletjeti pokraj i udaljavati se — zaustaviti materiju da se ne uruši u jednu točku u kojoj bi gustoća bila beskonačna. Slično tome, ako bi se širenje svemira pratilo unatrag kroz vrijeme, pokazalo bi se da sva materija u njemu nije proizašla iz jedne točke beskonačne gustoće. Ova točka beskonačne gustoće nazvana je singularnost i bila bi početak ili kraj vremena.

Godine 1963., dvojica ruskih znanstvenika, Evgenij Lifšic i Isaac Kalatnikov, objavili su dokaz da sva rješenja Einsteinovih jednadžbi pri kojima se javlja singularnost pretpostavljaju iznimno poseban raspored i raspodjelu brzina materije. Vjerojatnost da rješenje koje predstavlja naš svemir ima ova posebna svojstva praktički je ravna nuli. Gotovo sva rješenja koja bi mogla dati svemir izbjegla su singularnost beskonačne gustoće: prije razdoblja u kome se svemir širi morala je postojati faza sažimanja tijekom koje se tvar urušavala, ali ipak je za dlaku izbjegla potpunom kolapsu pa je otpočela nova faza sadašnjeg širenja. Ako je tome tako, vrijeme bi se zauvijek nastavilo: iz beskrajne prošlosti u beskrajnu budućnost.

Nisu, međutim, svi bili uvjereni radovima Lifšica i Kalatnikova. Roger Penrose i ja odabrali smo drukčiji pristup, zasnovan na potankom proučavanju rješenja, ali imajući u vidu sveukupnu strukturu prostorvremena. U općoj teoriji relativ-

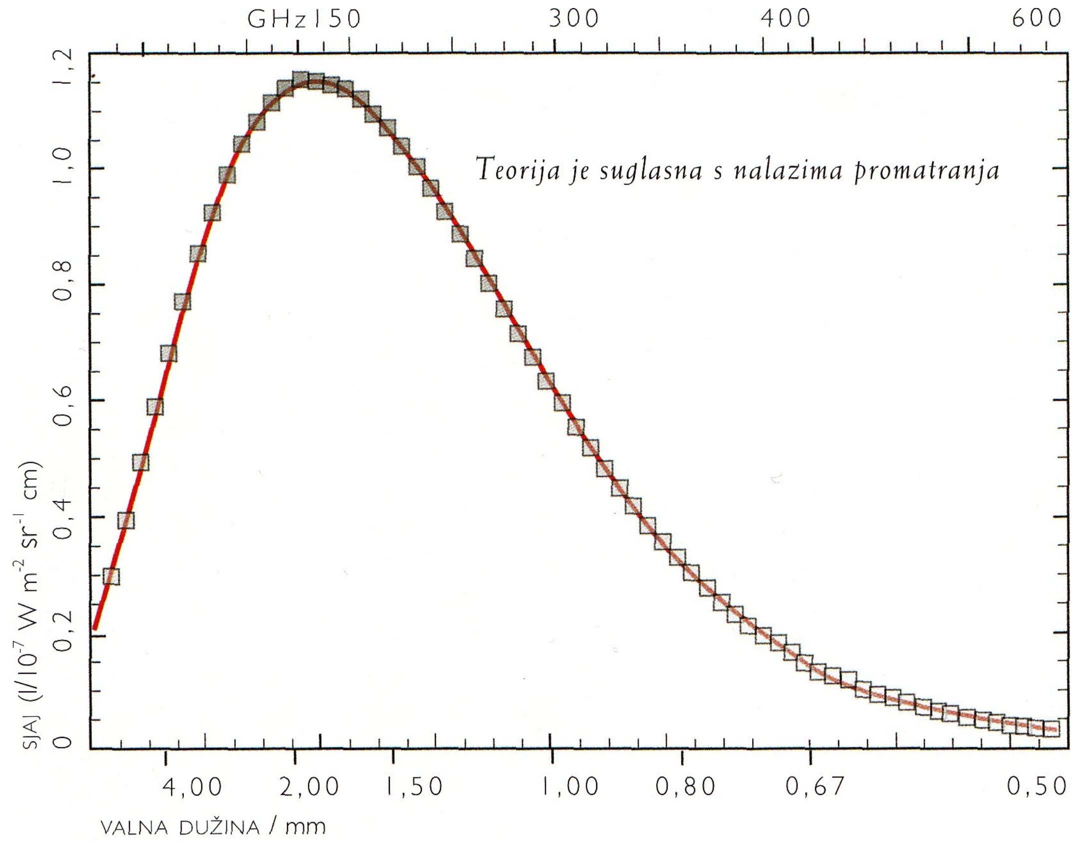




(IL. 2.5) NAŠ PROŠLOSNI SVJETLOSNI STOŽAC

Kada gledamo daleke galaktike, onda vidimo svemir u ranijim vremenima zato što svjetlost putuje konačnom brzinom. Ako vrijeme prikažemo na okomitoj osi, a dva od tri prostorna pravca na vodoravnim osima, svjetlost koja sada stiže do nas - a mi smo na vrhu stošca - putovala je prema nama uza stožac.

KOZMIČKI MIKROVALNI POZADINSKI SPEKTAR SA SATELITA COBE

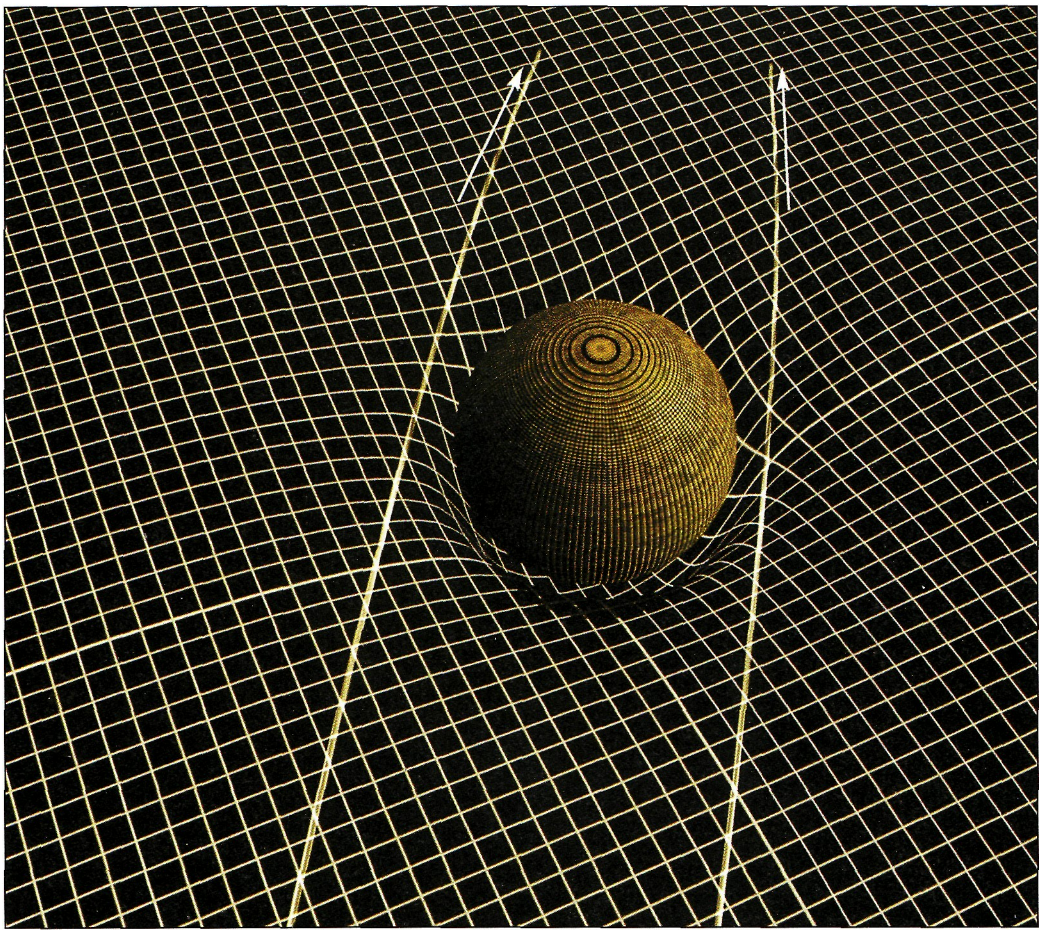


(Il. 2.6)
MJERENJE SPEKTRA POZADINSKOG ZRAČENJA

Spektar — raspodjela jačine po frekvencijama — kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja odgovara onome kakvo ima toplo tijelo. Da bi zračenje bilo u termalnoj ravnoteži, materija ju je morala raspršiti više puta. To ukazuje da je moralo postojati dovoljno materije u našem prošlosnom svjetlosnom stošcu da izazove njeno savijanje.

nosti, prostorvrijeme biva zakrivljeno ne samo pod utjecajem masivnih tijela u njemu nego i energijom koja tu postoji. Energija je uvijek pozitivna, što prostorvremenu daje zakrivljenost koja savija staze svjetlosnih zraka jedne prema drugima.

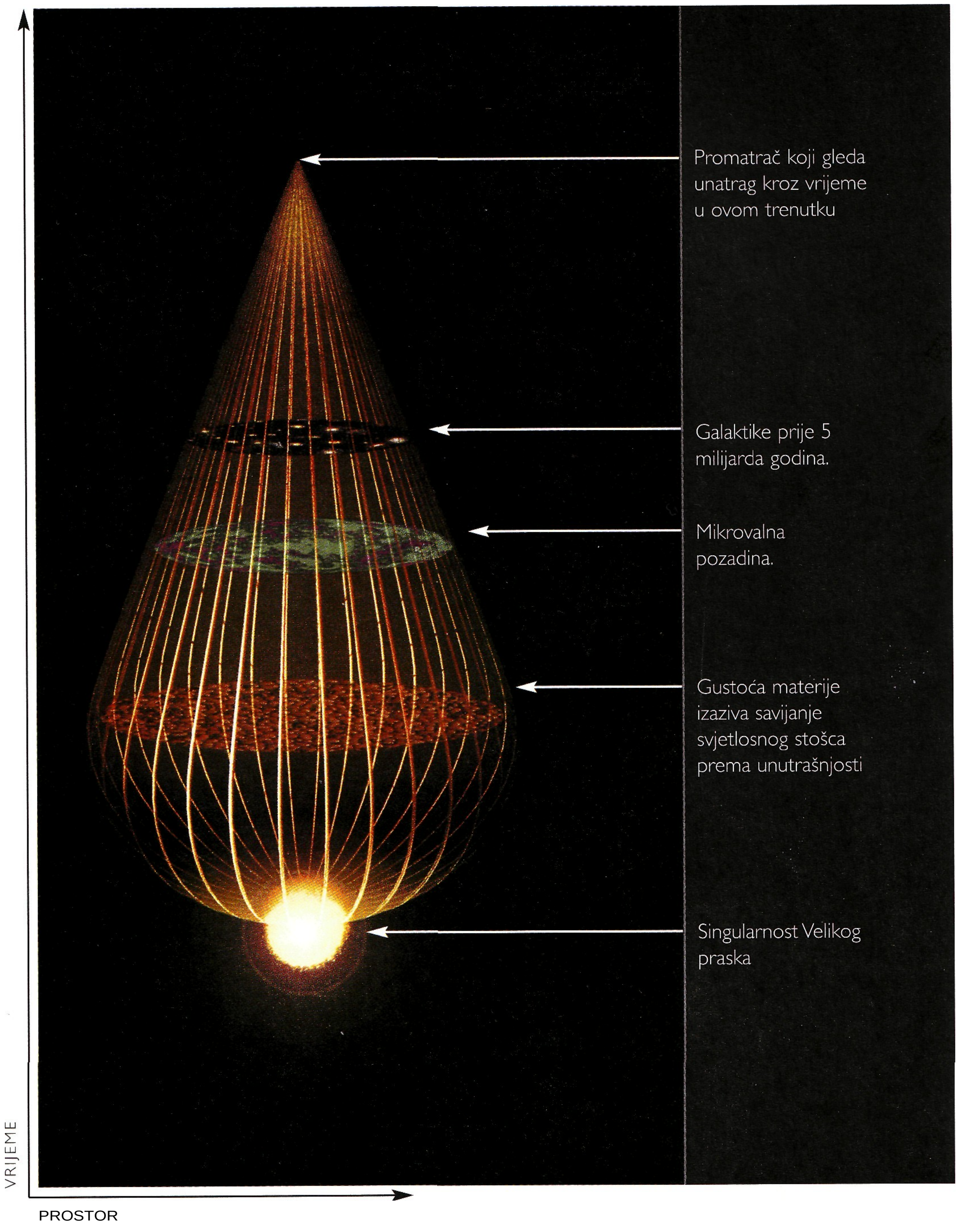
Razmotrimo sada naš prošlosni svjetlosni stožac (il. 2.5), a to znači staze koje prevaljuju svjetlosne zrake dalekih galaktika kroz prostorvrijeme, prije negoli u sadašnjosti stignu do nas. Na dijagramu, na kome je vrijeme prikazano okomito, a prostor vodoravno, iscrtan je stožac u čijem smo vrhu mi. Kako se spuštamo prema prošlosti niz stožac, vidimo galaktike u sve ranijim i ranijim vremenima. Budući da se svemir širio, pa je sve ranije bilo mnogo zbijenije, kako sve



dalje gledamo, to što vidimo su područja sve veće gustoće materije. Zapažamo slabo pozadinsko mikrovalno zračenje, koje se širi prema nama duž našeg prošlosnog svjetlosnog stošca iz znatno ranijeg vremena, kada je svemir bio mnogo gušći i topliji nego što je to sada. Ako podesimo prijamnike na različite mikrovalne frekvencije, možemo mjeriti spektar (raspodjelu energije po različitim frekvencijama) ovog zračenja. Zabilježit ćemo spektar koji odgovara zračenju tijela temperature 2,7 stupnja iznad apsolutne nule. Ovo mikrovalno zračenje nije dovoljno da se odmrzne smrznuta pizza, ali činjenica da se spektar poklapa tako točno s onim koji je svojstven tijelu temperature od 2,7 stupnja govori nam da je ovo zračenje moralo doći iz područja koja su neprozirna za mikrovalove (il. 2.6).

(IL. 2.7)
IZOBLIČENJE PROSTORVREMENA

Budući da je gravitacija privlačna sila, materija uvijek zakrivljuje prostorvrijeme tako da se svjetlosne zrake savijaju jedne prema drugima.


Promatrač koji gleda unatrag kroz vrijeme u ovom trenutku
Galaktike prije 5 milijarda godina.
Mikrovalna pozadina.
Gustoća materije izaziva savijanje svjetlosnog stošca prema unutrašnjosti
Singularnost Velikog praska
VRIJEME
PROSTOR

Možemo stoga zaključiti da naš prošlosni svjetlosni stožac, kako se prati unatrag, mora proći kroz izvjesnu količinu materije. Ta količina materije dovoljna je da zakrivi prostorvrijeme, tako da su svjetlosne zrake u našem prošlosnom svjetlosnom stošcu savijene unatrag jedne prema drugima (il. 2.7).

Kako se vraćamo u prošlost, poprečni presjek našeg prošlosnog svjetlosnog stošca postiže neku maksimalnu veličinu, a zatim se ponovno počinje smanjivati. Naša prošlost ima kruškasti oblik (il. 2.8).

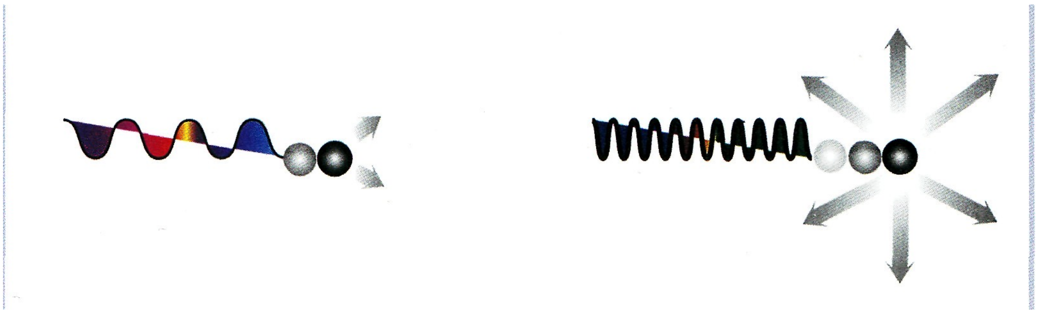
Ako nastavimo još dalje našim prošlosnim svjetlosnim stošcem unatrag, djeluje pozitivna energetska gustoća materije tako da se svjetlosne zrake još više približavaju. Poprečni presjek svjetlosnog stošca smanjit će se do nulte veličine u nekom konačnom vremenu. To znači da je sva materija unutar našeg prošlosnog svjetlosnog stošca zarobljena u području čije su granice svedene na nulu. Ne iznenađuje stoga previše da smo Roger Penrose i ja uspjeli dokazati da je u matematičkom modelu opće teorije relativnosti vrijeme moralo imati početak u onome što se naziva Veliki prasak. Slični razlozi pokazuju da će se vrijeme završiti kada zvijezde ili galaktike budu kolabirale pod vlastitom gravitacijom do stanja crnih jama. Prevladali smo Kantovu antinomiju čistog uma tako što smo odbacili njegovu implicitnu pretpostavku da vrijeme ima značenje nezavisno o svemiru. Naš rad u kome se dokazuje da vrijeme ima početak osvojio je drugu nagradu na natječaju što ga je 1969. bila raspisala Fondacija za istraživanje gravitacije. Roger i ja podijelili smo kneževsku svotu od 300 dolara. Sumnjam da se ijedan drugi nagrađeni rad iz te godine pokazao toliko trajnim kao naš.

Bilo je raznih reakcija na naš rad. On je uznemirio mnoge fizičare, ali je i oduševio one pobožne ljude koji su vjerovali u čin Postanka, jer ovim se dobivao znanstveni dokaz za to. Lifšic i Kalatnikov našli su se u nezgodnom položaju. Nisu mogli osporiti matematičke teoreme koje smo mi dokazali, ali u sovjetskom sustavu također nisu mogli priznati da su pogriješili, a da je zapadna znanost bila ispravna. No, izvukli su se iz škripca tako što su pronašli općenitiju porodicu rješenja sa singularnostima, koja nisu bila posebna na način na koji su to bila njihova prethodna rješenja. To im je omogućilo da objave kako su singularnosti — odnosno početak i kraj vremena — sovjetsko otkriće.

(IL. 2.8) VRIJEME JE KRUŠKOLIKO

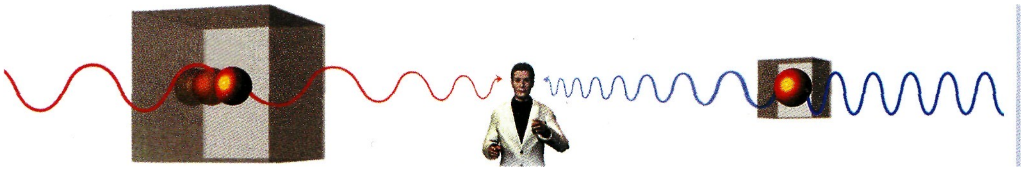
Ako se prati kroz vrijeme naš prošlosni svjetlosni stožac, vidi se da materija u ranom svemiru savija njegove zrake unatrag. Čitav svemir kojeg promatramo bio je u prošlosti skupljen u području čija se granica smanjuju do nule u Velikom prasku.To je singulamost — mjesto gdje bi gustoća materije bila beskonačna i gdje klasična opća teorija relativnosti više ne bi vrijedila.

NAČELO NEODREĐENOSTI



Niskofrekventne valne dužine manje ometaju brzinu čestice.

Visokofrekventne valne dužine više ometaju brzinu čestice.



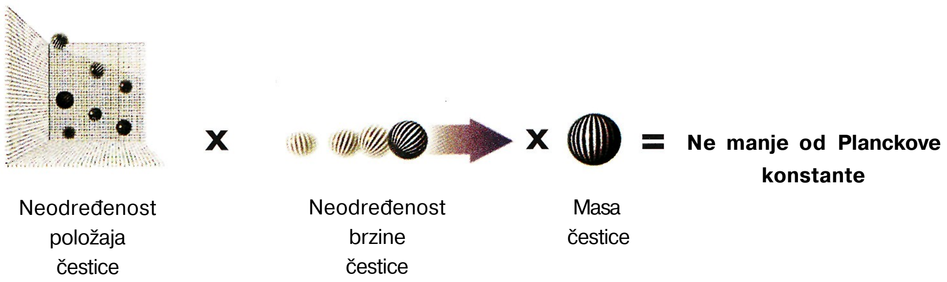
Što je veća valna dužina koja se koristi pri promatranju čestice, to je neodređeniji njen položaj.

Što je kraća valna dužina koja se koristi pri promatranju neke čestice, to je određeniji njen položaj.

Važan korak u otkriću kvantne teorije bila je zamisao Maxa Plancka iz 1900. da se svjetlost uvijek javlja u malim paketima koje je on nazvao kvanti. Ali iako je Planckova kvantna hipoteza pružila objašnjenje zračenja toplih tijela, njen puni značaj postao je jasan tek sredinom dvadesetih godina, kad je njemački fizičar Werner Heisenberg formulirao svoje znamenito načelo neodređenosti. On je primijetio da iz Planckove hipoteze proizlazi da što se točnije pokušava izmjeriti položaj neke čestice, to se manje točno može izmjeriti njena brzina i obratno.

Heisenberg je pokazao da umnožak neodređenosti položaja neke čestice i neodređenosti njenog impulsa mora uvijek biti veći od Planckove konstante, a to je veličina koja je blisko povezana s energetskim sadržajem jednog kvanta svjetlosti.

HEISENBERGOVA JEDNADŽBA NEODREĐENOSTI



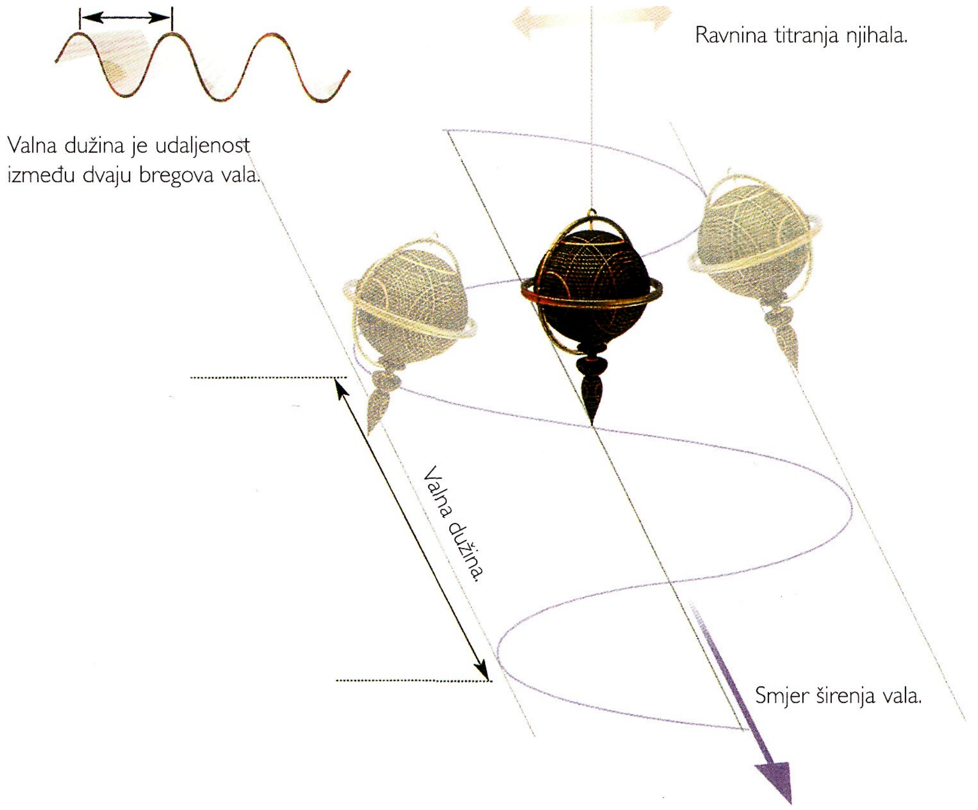
Većina fizičara i dalje instinktivno zazire od zamisli o tome da vrijeme ima početak i kraj. Oni su stoga isticali da se od ovog matematičkog modela ne može očekivati da bude dobar opis prostorvremena u blizini singularnosti. Razlog tome je okolnost da je opća teorija relativnosti, koja opisuje gravitacijsku silu, klasična teorija kao što je objašnjeno u prvom poglavlju, te kao takva ne obuhvaća neodređenost kvantne teorije, koja upravlja svim drugim silama za koje znamo. Ovo nesuglasje nema značenja u najvećem dijelu svemira tijekom najvećeg dijela vremena, budući da su zakrivljenosti prostorvremena vrlo velikih razmjera, dok su dimenzije na kojima su kvantna djelovanja bitna vrlo male. Međutim, u blizini singularnosti oba ova razmjera veličina postaju usporediva, tako da bi uz klasičnu gravitaciju do izražaja počeo dolaziti učinak kvantne teorije. Iz Penroseovih i mojih teorema o singularnosti proizlazilo je, dakle, da je naše klasično područje prostorvremena povezano s prošlošću, a možda i budućnošću, preko područja u kojima je kvantna gravitacija važna. Da bismo razumjeli nastanak i sudbinu svemira, potrebna nam je kvantna teorija gravitacije — i upravo će ona biti predmet pretežnog dijela ove knjige.

Kvantne teorije sustava kakav je atom, koji sadrži konačan broj čestica, postavili su još dvadesetih godina prošlog stoljeća Heisenberg, Schrodinger i Dirac. (Dirac je bio jedan od onih koji su prije mene držali ovu katedru, u doba kad ona još nije bila motorizirana.) Fizičari su se, međutim, suočili s poteškoćama kad su pokušali proširiti kvantne zamisli na Maxwellovo polje, koje opisuje elektricitet, magnetizam i svjetlost.

MAXWELLOVO POLJE

Britanski fizičar James Clerk Maxwell povezao je 1865. sve poznate zakone elektriciteta i magnetizira. Maxwellova teorija pretpostavlja postojanje "polja" koja prenose djelovanja s jednog mjesta na drugo. On je uvidio da su polja koja prenose električne i magnetske poremećaje dinamički entiteti: ona mogu titrati i gibati se kroz prostor.

Maxwellova sinteza elektromagnetizma može se sažeti u dvije jednadžbe koje propisuju dinamiku tih polja. On je sam izveo prvi veliki zaključak iz ovih jednadžbi: elektromagnetski valovi svih frekvencija kreću se kroz prostor istom stalnom brzinom — brzinom svjetlosti.

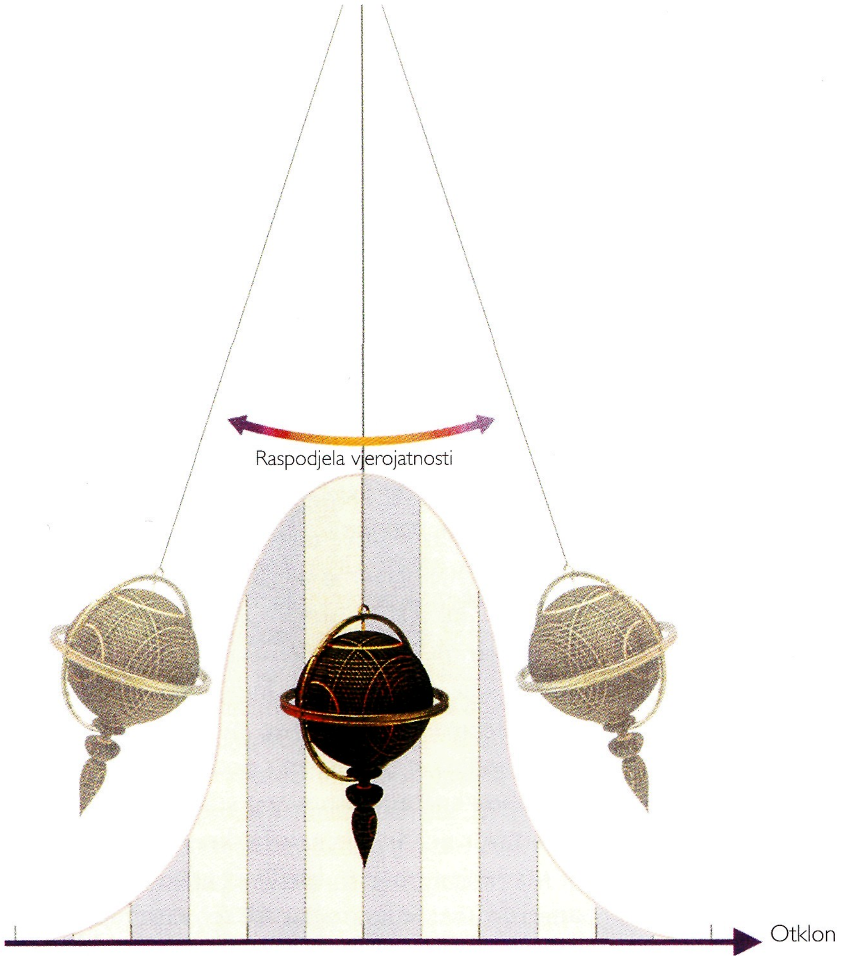


(Il 2.9)
PUTUJUĆI VAL S TITRAJUĆIM NJIHALOM

Elektromagnetno zračenje kreće se kroz prostor kao val, pri čemu električno i magnetno polje titraju poput njihala, u pravcu okomitom na smjer širenja vala. Zračenje se može sastojati od polja raznih valnih dužina.

Maxwellovo polje može se zamisliti kao da je sazdano od valova različitih valnih dužina (udaljenost između dvaju susjednih bregova). U jednom valu polje se njiše od jedne vrijednosti do druge kao njihalo (il. 2.9).

Prema kvantnoj teoriji, osnovno stanje ili najniže energetsko stanje njihala nije ono u najnižoj energetskoj točki, kada je njihalo u položaju mirovanja i pokazuje točno okomito prema dolje. Tada bi ono imalo i određen položaj i određenu brzinu koji su ravni nuli. Bilo bi to kršenje načela neodređenosti koje zabranjuje točno mjerenje i položaja i brzine istovremeno. Umnožak neodređenosti položaja i neodređenosti momenta mora biti veći od određene vrijednosti poznate kao Planckova konstanta — broj koji je predugačak za pisanje, tako da se za njega koristi simbol $\hbar$, a izgovara se "h poprečno".



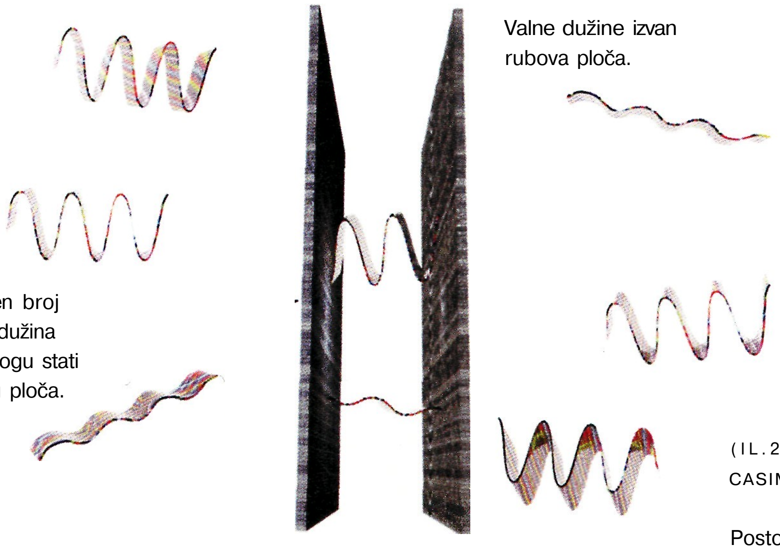
Prema tome, osnovno stanje ili najniže energetsko stanje njihala nema nultu energiju, kao što bi se to moglo očekivati. Ustvari, čak i u svom osnovnom stanju, njihalo ili bilo koji drugi oscilirajući sustav mora imati u izvjesnom minimalnom opsegu ono što se naziva fluktuacija nulte točke. To znači da njihalo neće pokazivati točno okomito prema dolje, već će postojati izvjesna vjerojatnost da je ono pod malim kutom u odnosu na okomicu (il.2.10). Slično tome, čak i u vakuumu najnižeg energetskog stanja, valovi u Maxwellovom polju neće iznositi točno nula već će moći imati neke male vrijednosti. Što je viša frekvencija (broj njihaja u minuti) njihala ili vala, to je viša energija osnovnog stanja.

(IL.2.10)
NJIHALO KRIVULJA VJEROJATNOSTI

Prema Heisenbergovom načelu, mora njihalo i u najnižem energetskom stanju pokazivati neki minimum fluktuacija, to jest brzinu različitu od nule. Njegov je položaj zadan prema krivulji raspodjele vjerojatnosti: U osnovnom stanju je najvjerojatnije da njihalo stoji točno okomito prema dolje, ali izvjesna je i određena vjerojatnost da je otklonjeno za neki kut od okomice.

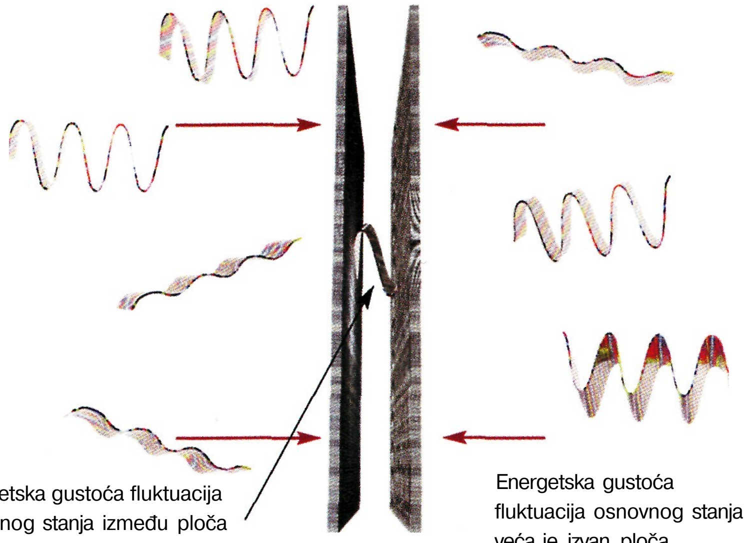
Proračuni fluktuacija osnovnog stanja u Maxwellovom i elektronskom polju daju beskonačne vrijednosti prividne mase i naboja elektrona, ali to nije ono što se dobiva mjerenjem. No, četrdesetih godina prošlog stoljeća fizičari Richard Feynman, Julian Schwinger i Shin'ichiro Tomonaga usavršili su pouzdan način uklanjanja ili "oduzimanja" ovih beskonačnosti, tako da su preostale samo konačne izmjerene vrijednosti mase i naboja. Ipak, fluktuacije osnovnog stanja i dalje proizvode male učinke, koji se mogu izmjeriti i koja su u suglasju s ishodima pokusa. Slični postupci oduzimanja zbog uklanjanja beskonačnosti vrijede i kod takozvanog Yang-Millsovog polja, u okviru teorije koju su postavili Chen Ning Yang i Robert Mills. Yang-Millsove teorije su proširenje Maxwellove teorije elektromagnetizma, a matematički opisuju druge dvije osnovne sile (ili međudjelovanja) - slabu i jaku nuklearnu silu. No, fluktuacije osnovnog stanja imaju znatno ozbiljniji utjecaj u okviru kvantne teorije gravitacije. I ovdje svaka valna dužina ima neko osnovno energetsko stanje. Budući da nema ograničenja glede kratkoće valnih dužina Maxwellovog polja, postoji beskonačan broj različitih valnih dužina u bilo kojem području prostorvremena, kao i beskonačna količina energije osnovnog stanja. Budući da je energija — kao i materija — izvor gravitacije, ova beskrajna gustoća energije morala bi značiti da u svemiru postoji dovoljno gravitacijskog privlačenja da zakrivi prostorvrijeme u jednu točku, ali to očito nije slučaj.

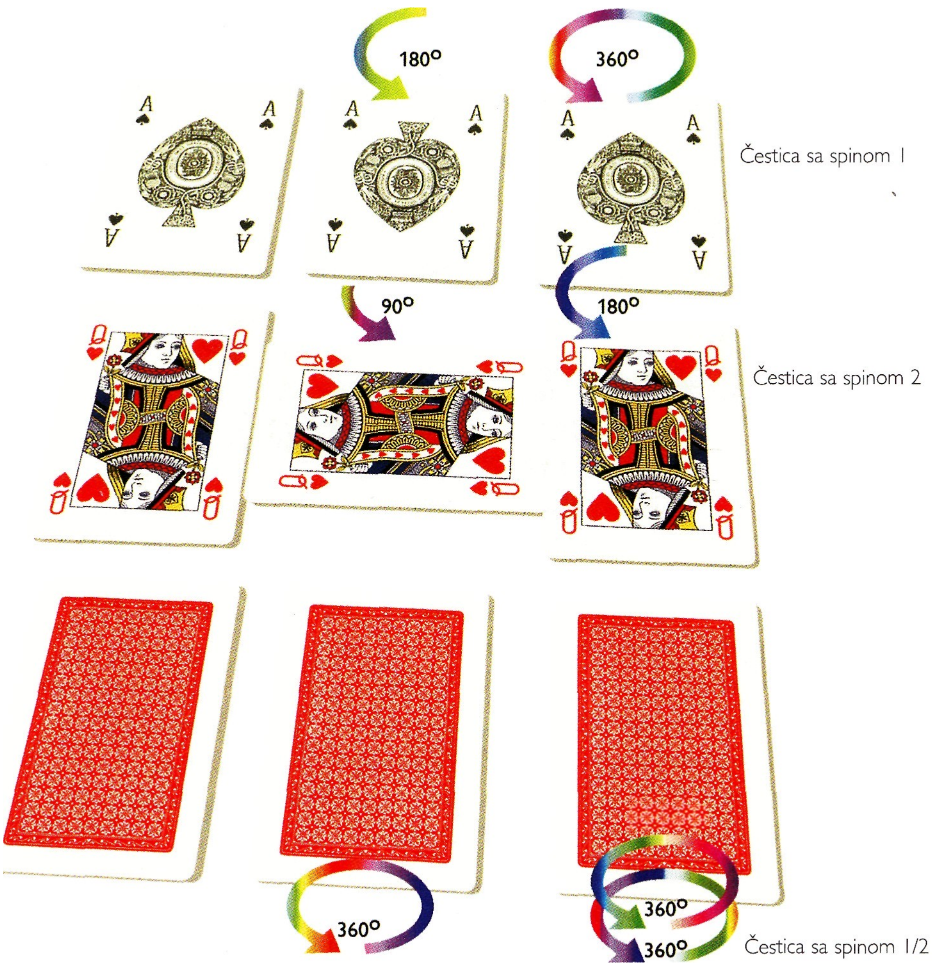
Moglo bi se pomisliti da bi se ovaj problem prividnog proturječja između ishoda promatranja i teorije riješio tako što bi se reklo da fluktuacije osnovnog stanja nemaju nikakvog gravitacijskog učinka, ali to je pogrešno. Energija fluktuacija osnovnog stanja može se dokazati takozvanim Casimirovim učinkom. Ako postavite dvije metalne ploče usporedo jednu s drugom, na vrlo maloj udaljenosti, one će izazvati izvjesno smanjenje broja valnih dužina koje postoje između njih, u usporedbi s brojem valnih dužina izvan ploča. To znači da je energetska gustoća fluktuacija osnovnog stanja između ploča, iako i dalje beskonačna, manja za izvjesnu konačnu vrijednost od vanjske energetske gustoće (il.2.11). Ova razlika u gustoći stvara silu koja međusobno privlači ploče, a ta sila zabilježena je u pokusima. Sile su izvor gravitacije u teoriji relativnosti, baš kao što je to i materija, tako da ne bi bilo u redu ispustiti iz vida gravitacijsko djelovanje ove energetske razlike.



(IL.2.II)
CASIMIROV UČINAK

Postojanje fluktuacija osnovnog stanja eksperimentalno je potvrđeno Casimirovim učinkom, slabom silom između paralelnih metalnih ploča.



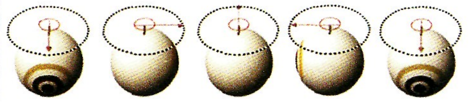


(IL. 2,12) SPIN

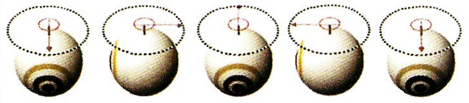
Sve čestice imaju svojstvo zvano spin, o kojem ovisi kako izgleda čestica gledana s raznih strana. To se može ilustrirati primjerom igraćih karata. Uzmimo prvo pik asa. On izgleda isti tek kad ga okrenemo za pun krug, 360°. Za njega se stoga kaže da ima spin 1.

Suprotno tome, herc dama ima dvije glave pa je zbog toga ista slika već nakon samo pola kruga, 180°. Njen spin je 2. Mogu se zamisliti objekti sa spinom 3 ili nekim većim, koji bi izgledali isti nakon još manjeg kuta okretanja.

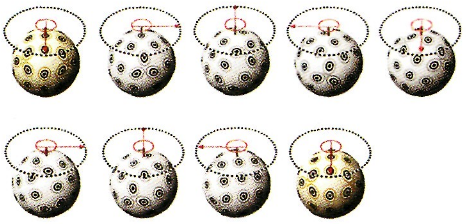
Što je spin veći, to je potreban zakret za manji dio kruga kako bi čestica izgledala isto. No, izuzetna je činjenica — za kakvu nema primjera u svijetu svakidašnjice — da postoje čestice koje izgledaju isto samo kad ih okrenete za dva puna kruga. Za njih se kaže da imaju spin 1/2.



Čestica sa spinom 1



Čestica sa spinom 2



Čestica sa spinom 1/2

Drugo moguće rješenje ovog problema mogla bi biti pretpostavka da postoji kozmološka konstanta slična onoj koju je Einstein uveo, nastojeći dobiti model statičnog svemira. Kada bi ta konstanta imala beskonačnu negativnu vrijednost, mogla bi točno poništiti beskonačnu pozitivnu vrijednost energija osnovnog stanja u slobodnom svemiru, ali ovakva kozmološka konstanta izgleda vrlo *ad hoc* rješenje za nuždu i morala bi biti izuzetno točno podešena.

Srećom, tijekom 1970-ih otkrivena je potpuno nova vrsta simetrije koja pruža prirodni fizički mehanizam za poništvanje beskonačnosti što niču iz fluktuacija osnovnog stanja. Riječ je o takozvanoj supersimetriji, jednome svojstvu mnogih novijih fizikalnih teorija koje se može opisati na razne načine. Jedan od njih je da prostorvrijeme ima dodatne dimenzije osim ovih kojih smo mi svjesni. One se nazivaju Grassmannove dimenzije zato što se mjere brojevima poznatim kao Grassmannove varijable, a ne običnim stvarnim brojevima. Kod običnih brojeva svejedno je kojim ćete ih redom množiti: 6 puta 4 isto je što i 4 puta 6. Ali kod Grassmannovih varijabli vrijedi antikomutativnost: x puta y isto je kao —y puta x.

OBIČNI BROJEVI

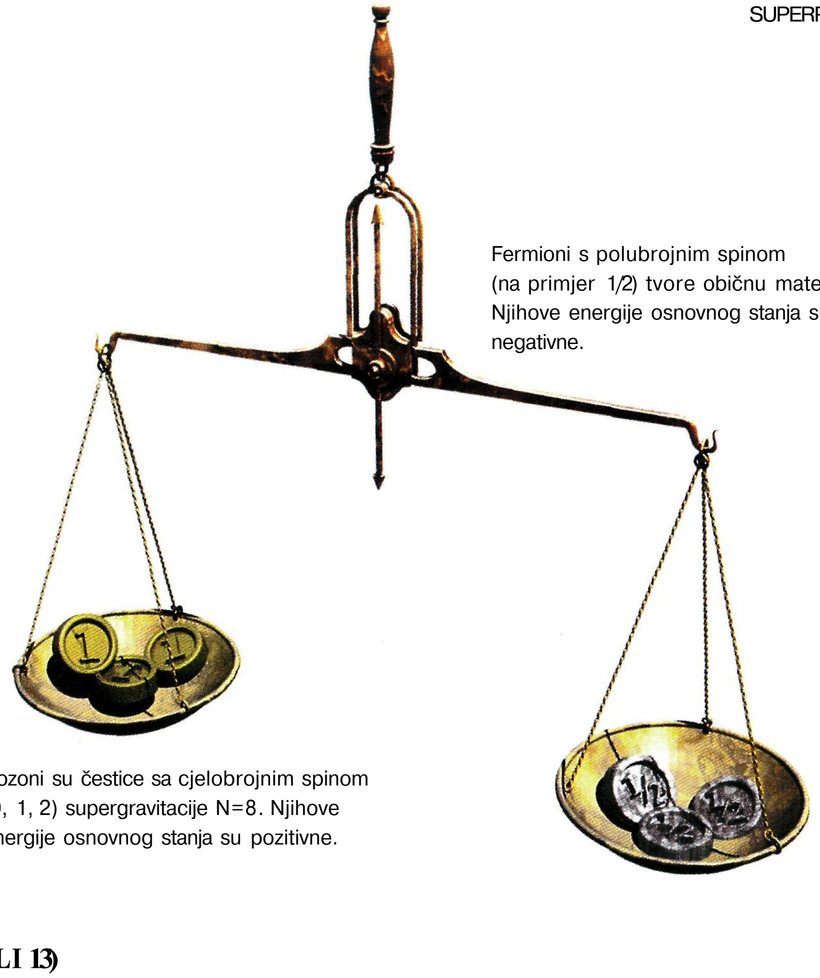
$A \times B = B \times A$

GRASSMANNOVI BROJEVI

$A \times B = -B \times A$

Supersimetrija kao sredstvo za uklanjanje beskonačnosti prvi put je primijenjena kod polja materije i Yang-Millsovih polja, i to u jednom prostorvremenu u kojem su i uobičajene dimenzije i Grassmannove dimenzije ravne, a ne zakrivljene. Korak dalje je proširenje na zakrivljene obične dimenzije i na Grassmannove dimenzije. Ovo je dovelo do brojnih teorija pod zajedničkim nazivom supergravitacija, s različitim brojem supersimetrija. Jedna od posljedica supersimetrije jest da svako polje ili čestica treba imati "superpartnera" sa spinom, koji je za polovinu veći ili manji od njihovog (il. 2.12).

SUPERPARTNERI



Fermioni s polubrojnim spinom (na primjer 1/2) tvore običnu materiju. Njihove energije osnovnog stanja su negativne.

Bozoni su čestice sa cjelobrojnim spinom (0, 1, 2) supergravitacije N=8. Njihove energije osnovnog stanja su pozitivne.

(LI 13)

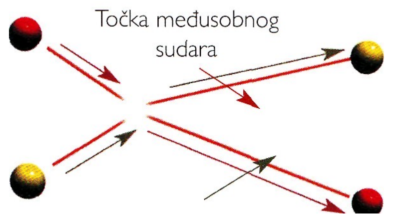
Sve poznate čestice u svemiru pripadaju jednoj od dviju skupina: fermionima ili bozonima, Fermioni su čestice s polubrojnim spinom (kao što je 1/2) i one tvore običnu materiju. Njihove energije osnovnog stanja su negativne.

Bozoni su čestice sa cjelobrojnim spinom (kao što su 0, 1, 2) i oni su odgovorni za sile između fermiona, kao što su gravitacija i zračenje. Njihove energije osnovnog stanja su pozitivne.Teorija supergravitacije pretpostavlja da svaki fermion i svaki bozon imaju superpartnera sa spinom, koji je za 1/2 veći ili za 1/2 manji. Na primjer, foton (koji je bozon) ima spin 1. Njegova energija osnovnog stanja je pozitivna. Spin fotonovog superpartnera, fotina, iznosi 1/2, tako da je on fermion. Njegova energija osnovnog stanja stoga je negativna.

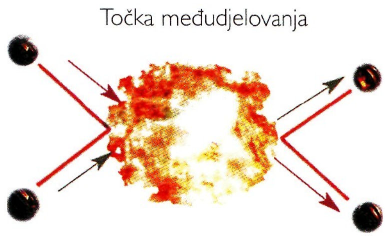
U ovoj shemi supergravitacije na kraju imamo isti broj bozona i fermiona. Kako su energije osnovnih stanja bozona pozitivne, a fermiona negativne, one se međusobno poništavaju, uklanjajući tako najveće beskonačnosti.

MODELI PONAŠANJA ČESTICA

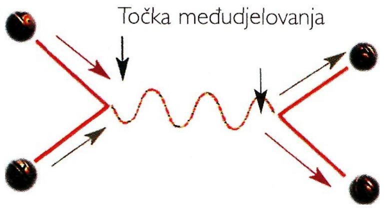
1 Kada bi točkaste čestice postojale kao zasebni elementi slični bilijarskim kuglama, tada bi se, nakon sudara, nastavile gibati po novim stazama.



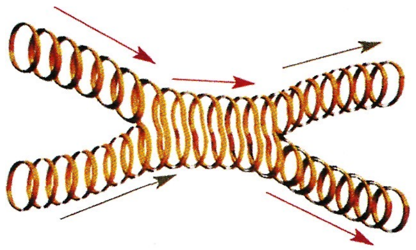
2 To je ono što se, izgleda, događa kada dvije čestice stupe u međudjelovanje, iako je učinak daleko dramatičniji.



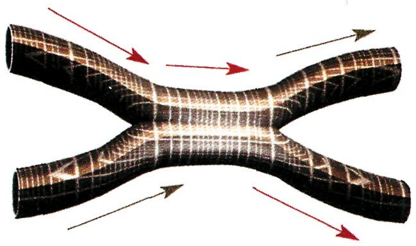
3 Kvantna teorija prikazuje sudar dviju čestica, na primjer elektrona i njegove antičestice (pozitrona). Pri sudaru one se nakratko međusobno ponište u silovitom bljesku energije, stvarajući jedan foton. Ovaj zatim oslobađa svoju energiju, stvarajući novi elektron-pozitron par. Ovdje također izgleda kao da su se nakon sudara čestice razišle po novim stazama.



4 Ako čestice nisu nulte točke, već jednodimenzione strune kod kojih vibrirajuće petlje titraju kao elektron i pozitron, onda, nakon što se sudare i međusobno ponište, stvaraju novu strunu s drugim ustrojem vibriranja. Oslobađajući energiju, struna se dijeli na dvije strune, nastavljajući novim stazama.



5 Ako se prvobitne strune promatraju ne kao zasebni trenutci već se prikazuju kao neprekinuta povijest u vremenu, tada vidimo proces kao strunsku svjetsku plohu.



(Il. 2.14, str: 53)
OSCILACIJE STRUNA

U teoriji struna temeljni predmeti nisu čestice koje zauzimaju pojedinačnu točku u prostoru, već jednodimenzione strune.Te strune mogu imati krajeve ili im krajevi mogu biti spojeni u zatvorene petlje.

Kao i strune na violini, strune u teoriji struna podržavaju izvjesne vibracijske uzorke ili rezonantne frekvencije, čije se valne dužine točno uklapaju između dvaju krajeva.

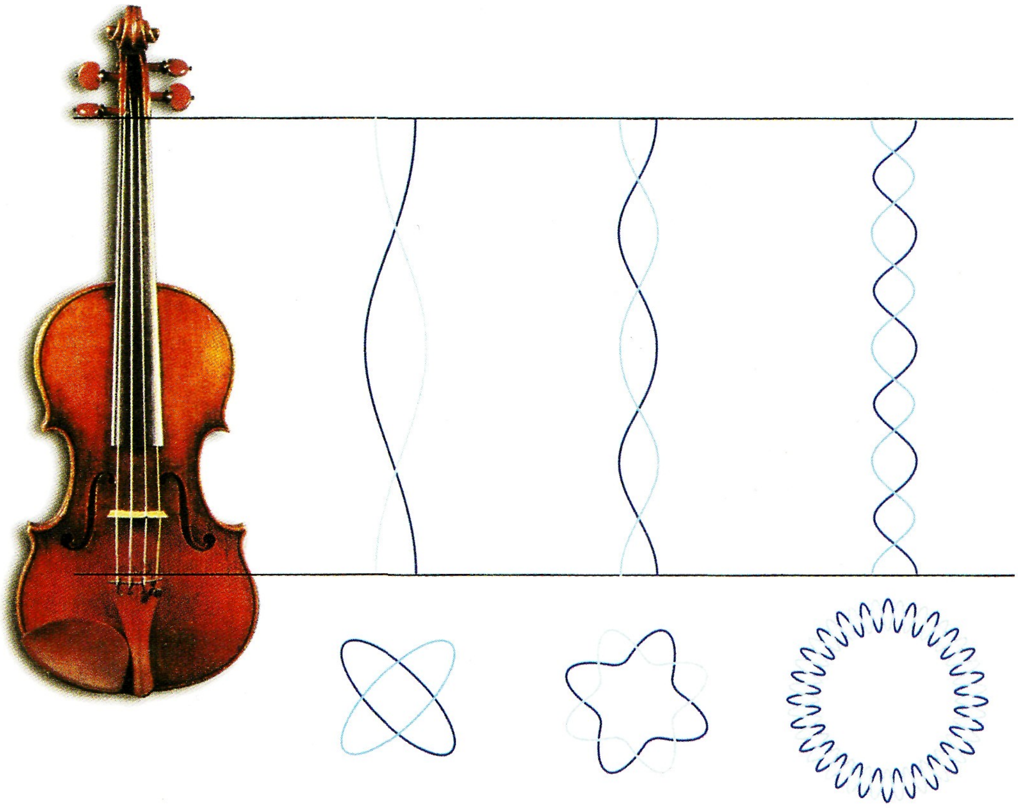
Ali dok različite rezonantne frekvencije struna violine daju različite glazbene note, različite oscilacije na strunama daju različite mase i naboje sila, koje se onda tumače kao elementarne čestice. Grubo govoreći, što je kraća valna dužina oscilacija na struni, to je veća masa čestice.

Preostala je mogućnost da ipak postoje manje, ali i dalje beskonačne zaostale količine. Nitko nije pokazao strpljenje neophodno da se izračuna jesu li ove teorije doista potpuno konačne. Procijenjeno je da bi za ovaj posao jednom dobrom studentu bilo potrebno dvije stotine godina, a kako da budete sigurni da mu se nije potkrala neka pogreška već na drugoj stranici? No, sve do 1985. većina fizičara vjerovala je da je većina teorija o supersimetričnoj supergravitaciji lišena beskonačnosti.

A onda se moda iznenada promijenila. Stručnjaci su počeli izjavljivati da nema razloga da se ne očekuju beskonačnosti u teorijama supergravitacije, što je značilo da u njima postoji neka kobna pogreška. Umjesto toga, javilo se uvjerenje da je takozvana supersimetrična teorija struna jedini način da se dovedu u vezu gravitacija i kvantna teorija. Ove strune (niti, konci), kao neki njihovi idealizirani rođaci po imenu iz svakodnevnog iskustva, su jednodimenzioni izduženi objekti. Imaju samo dužinu. U toj teoriji, struje se gibaju spram pozadine prostorvremena. Nabori — ili valići — na struni protumačeni su kao čestice (il. 2.14).

Ako osim normalnih dimenzija poznatog nam prostora i vremena strune imaju još i Grassmannove dimenzije, onda bi ovi titraji (ili valići, ako vam je draže) odgovarali bozonima i fermionima. U tom slučaju energije pozitivnog i negativnog energetskog stanja međusobno bi se tako potpuno poništile da ne bi bilo beskonačnosti čak ni manje vrste. Superstrune, tvrdilo se, su ona sveobuhvatna "Teorija svega".

Budućim povjesničarima znanosti bit će zanimljivo pratiti promjene mišljenja medu današnjim teorijskim fizičarima. Nekoliko godina strune su bile nedodirljive, dok je supergravitacija odbačena kao samo približna teorija koja vrijedi pri nižim energijama. Kvalifikacija "niže energije" bila je naročito otežavajuća, iako su se u ovom kontekstu pod nižim energijama podrazumijevale čestice s energijama ispod onih koje su milijardu milijarda puta veće od energije neke molekule pri eksploziji TNT-a. Ako je supergravitacija samo niskoenergetska približnost, onda se za nju ne može tvrditi da je temeljna teorija svemira. Umjesto toga, za takvu teoriju smatrana



je jedna od pet mogućih teorija superstruna. Ali koja od pet teorija struna opisuje naš svemir? I kako se teorija struna može formulirati u složenijem, a ne samo približnom obliku, u okviru kojeg su strune prikazivane kao površine s jednom prostornom dimenzijom i jednom vremenskom dimenzijom u ravnoj pozadini prostorvremena? Ne bi li strune zakrivile to pozadinsko prostorvrijeme?

U godinama nakon 1985. postupno je postalo jasno da teorija struna nije potpuna slika. Prije svega, uvidjelo se da su strune samo jedan član široke klase objekata koji se mogu proširiti u više od jedne dimenzije. Paul Townsend koji je, kao i ja, član Odjela za primijenjenu matematiku i teorijsku fiziku na Cambridgeu i koji je dao mnogo temeljnih radova o ovim objektima, nazvao ih je "p-brane". Neka p-brana ima dužinu u p smjerova. Dakle, p = 1 brana je struna, p = 2 brana je površina ili membrana, i tako dalje (il. 2.15). Nema razloga da se daje prednost slučaju p = 1 strune u odnosu na ostale moguće vrijednosti p. Naprotiv, treba uvesti načelo p-branske demokracije: sve p-brane stvorene su kao jednake.

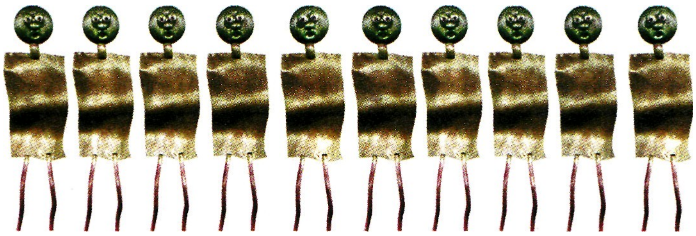
Sve p-brane mogu se naći kao rješenja jednadžbi teorija supergravitacije u 10 ili 11 dimenzija. Premda 10 ili 11 dimenzija kao da imaju malo zajedničkog s prostorvremenom kakvog znamo iz iskustva, osnovna zamisao je u tome da su sve ostale dimenzije tako sitno smotane da ih mi ni ne zamjećujemo; svjesni smo samo postojanja četiriju velikih i gotovo ravnih dimenzija.

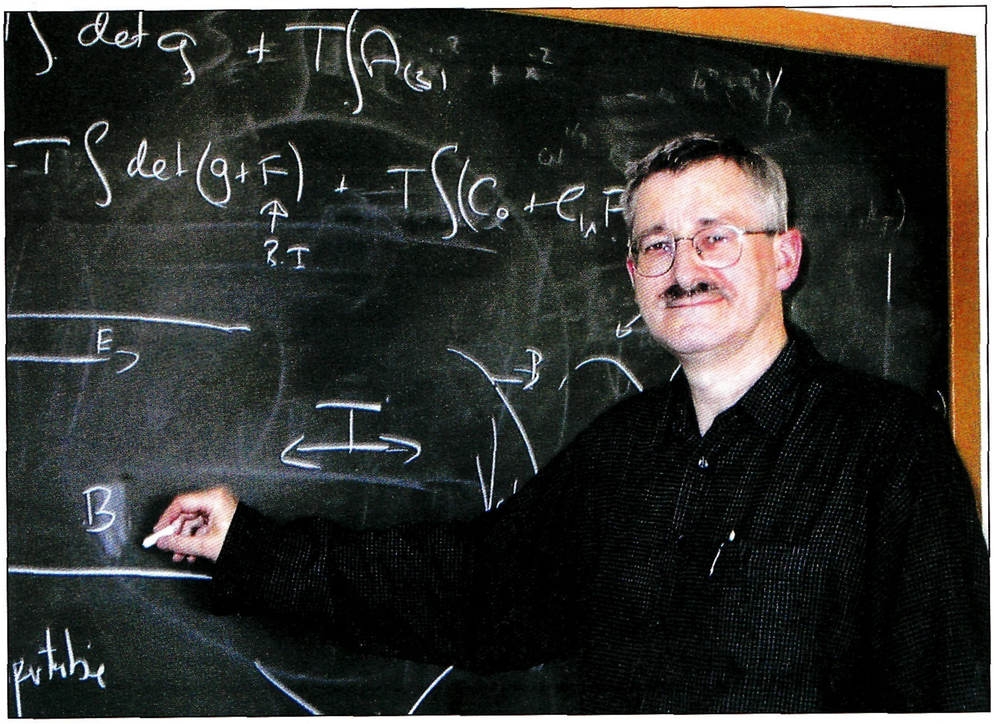
(IL 2.15) P-BRANE

P-brane su objekti koji se prostiru u p-dimenzija. Posebni slučajevi su strune p = 1 i membrane p = 2, ali veće vrijednosti p moguće su u desetodimenzionom ili jedanaestodimenzionom prostorvremenu. Često su neke ili sve p-dimenzije zamotane poput torusa.

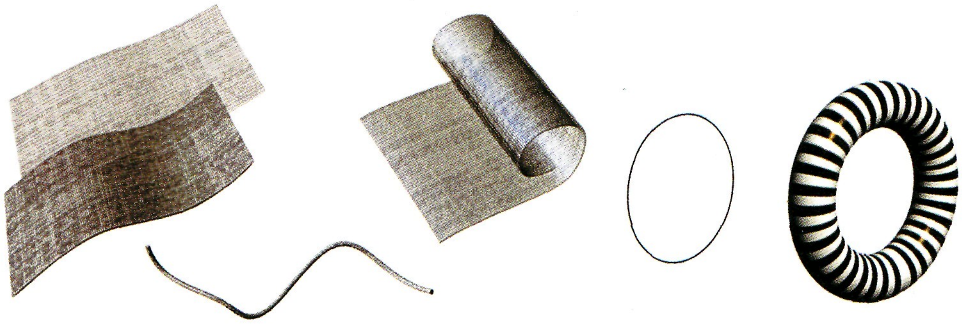
Moram reći da osobno nisam bio spreman povjerovati u ove dodatne dimenzije. Međutim, budući da sam pozitivist, pitanje "Postoje li zaista dodatne dimenzije?" za mene nema smisla. Sve što se može pitati je to nude li matematički modeli s dodatnim dimenzijama dobar opis svemira. Još ne raspolažemo nikakvim promatračkim nalazima za čije bi objašnjenje bile neophodne dodatne dimenzije. Postoji, međutim, mogućnost da ćemo ih vidjeti u Velikom sudaraču hadrona — prstenastom spremniku hadrona — koji se upravo gradi pokraj Ženeve. Ali ono što je uvjerilo mnoge ljude,

Smatramo da su ove istine očigledne: sve p-brane stvorene su jednake!





Paul Townsend, predvodnik p–brana

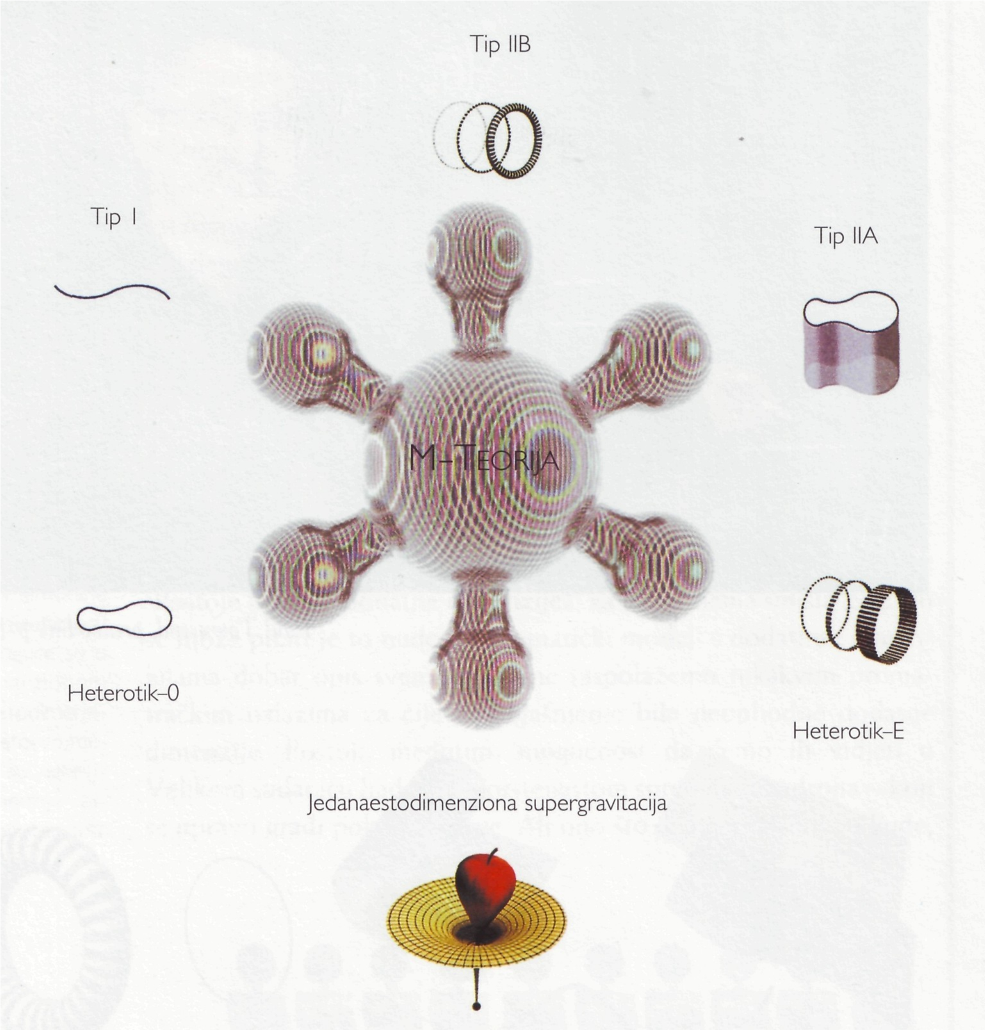


Prostorno tkivo našeg svemira može imati i ispružene i sklupčane dimenzije. Membrane se mogu bolje vidjeti ako su sklupčane.

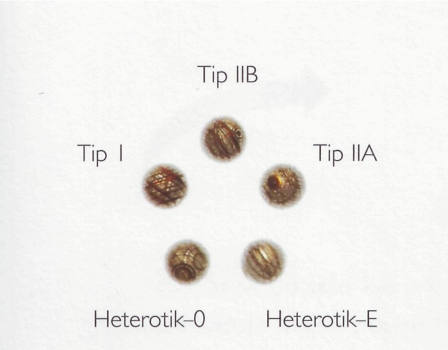
1 - brana ili sklupčana struna.

2 - branska površina sklupčana kao torus.

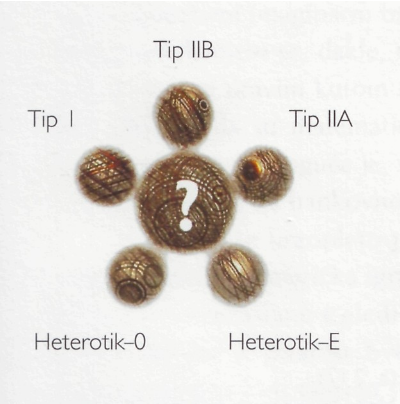
(IL 2.16) JEDINSTVENI SUSTAV



Postoji mreža odnosa, takozvanih dvojnosti, koja povezuje svih pet teorija struna, i jedanaestodimenzionu supergravitaciju. Dvojnosti upućuju na to da su različite teorije struna samo različiti izričaji jedne te iste temeljne teorije koja je nazvana M-teorija.



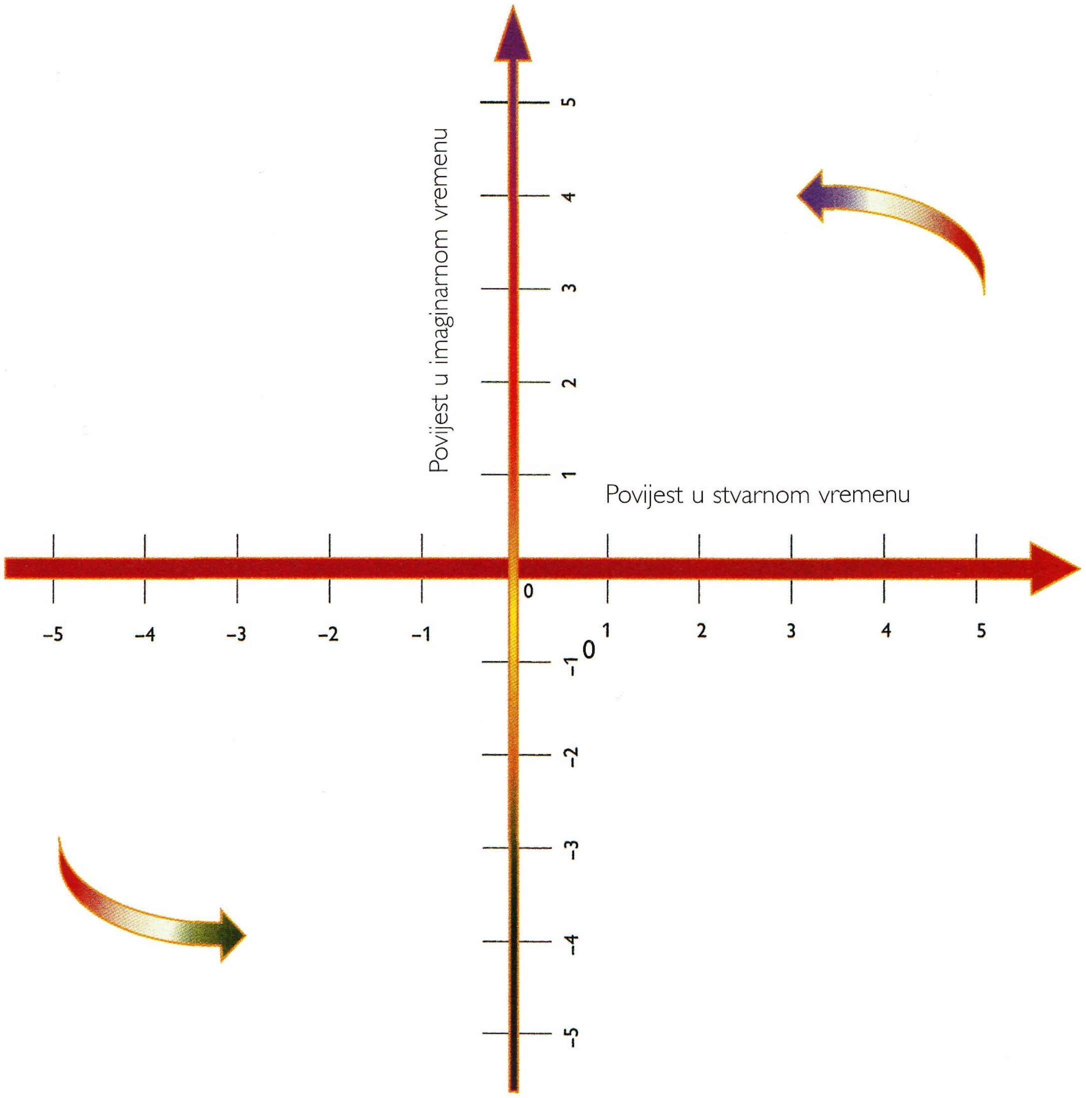
Prije sredine devedesetih godina izgledalo je da postoji pet različitih teorija struna, od kojih je svaka bila sama za sebe i bez veze s ostalima.



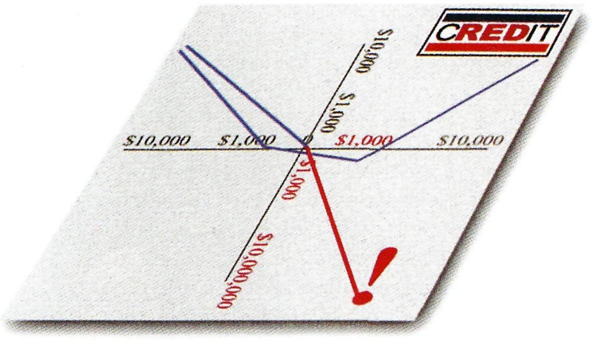
M-teorija objedinjuje pet teorija struna u jedinstveni teorijski sustav, no mnoga njegova svojstva još nam nisu dovoljno jasna.

računajući tu i mene, da ozbiljno treba uzeti modele s dodatnim dimenzijama, jest postojanje neočekivanih odnosa, nazvanih dualitetima, između ovih modela. Ti dualiteti pokazuju da su svi modeli u biti ekvivalentni; drugim riječima, oni su samo različiti oblici iste osnovne teorije koja je dobila naziv M-teorija. Ne shvatiti ovu mrežu dualiteta kao znak da smo na pravom putu bilo bi pomalo slično vjerovanju da je Bog prokrijumčario fosile u stijene kako bi Danvina uputio na pogrešan put glede evolucije života.

Ovi dualiteti pokazuju da svih pet teorija o superstrunama opisuju istu fiziku, kao i da su one fizički ekvivalentne supergravitaciji (il. 2.16). Ne može se reći da su superstrune osnovnije od supergravitacije ili obratno, već bi se prije moglo reći da su to zapravo razni izresci iz jedne te iste temeljne teorije, od kojih je svaki koristan za izračunavanja u različitim situacijama. Kako u teorijama struna nema beskonačnosti, one su pogodne za izračunavanja onoga što se događa kada se nekoliko visokoenergetskih čestica sudari i zatim raspirši. Od njih, međutim, nema mnogo koristi kada treba opisati kako energija velikog broja čestica zakrivljuje svemir ili stvara neko vezano stanje, kakvo je crna jama. Za ove situacije potrebna je supergravitacija, koja je zapravo Einsteinova teorija zakrivljenog prostorvremena, proširena s nekim dodatnim vrstama materije. O tome ću uglavnom govoriti u nastavku knjige.



(L2.17)
Može se napraviti matematički model u kojem postoji imaginarni pravac vremena pod pravim kutom u odnosu na obično, stvarno vrijeme. Model ima pravila koja određuju povijest u imaginarnom vremenu u smislu povijesti u stvarnom vremenu, i obratno.

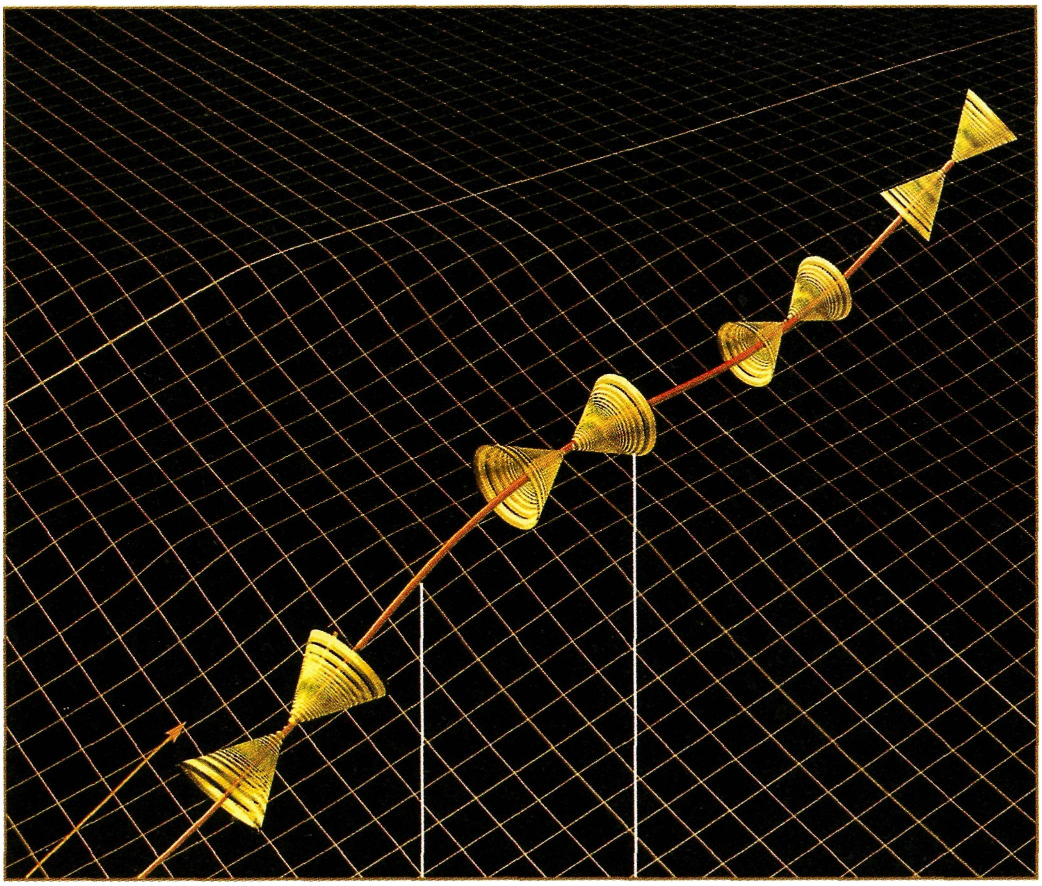


(IL.2.18)
Imaginarni brojevi su matematička konstrukcija. Nemoguće je dobiti saldo na bankovnom računu u imaginarnim brojevima.

Da bi se opisalo kako kvantna teorija oblikuje vrijeme i prostor, korisno je uvesti pojam imaginarnog vremena. Imaginarno vrijeme zvuči poput neke znanstvene fantastike, ali riječ je o čvrsto utemeljenom matematičkom pojmu: to je vrijeme izraženo u takozvanim imaginarnim brojevima. Obični realni brojevi — kao što su 1, 2, —3,5 — mogu se prikazati kao točke na brojnome pravcu: nula je gdje je stavimo — recimo u sredinu slike — dok su pozitivni realni brojevi desno od nje, a negativni realni brojevi lijevo (il. 2.17).

Imaginarni brojevi mogu se sad prikazati kao točke na okomitom brojnom pravcu koji prolazi kroz nulu: nula je i ovdje u središtu, dok su pozitivni imaginarni brojevi iznad nje, a oni negativni ispod. Imaginarni brojevi se, dakle, mogu zamisliti kao nova vrsta brojeva koja stoji pod pravim kutom u odnosu na poznate nam realne brojeve. Budući da su matematička konstrukcija, nije neophodno da fizički postoje; nemoguće je, naime, imati imaginarni broj jabuka ili imaginarni saldo na bankovnom računu. (il. 2.18).

Moglo bi se brzopleto pomisliti da to znači da su imaginarni brojevi samo matematička igra koja nema veze sa stvarnim svijetom. Međutim, promatrano s gledišta pozitivističke filozofije, nemoguće je odrediti što je stvarno. Sve što možemo je tragati za matematičkim modelima koji opisuju svemir u kojem živimo. Pokazuje se da matematički model koji se temelji na imaginarnim brojevima predviđa ne samo djelovanja koja smo već primijetili nego i djelovanja koja nismo mogli izmjeriti, ali smo u njih ipak vjerovali zbog drugih razloga. Što je, dakle, stvarno, a što je imaginarno? Postoji li ovo razlikovanje samo u našim umovima?



Smjer vremena   Povijest promatrača   Svjetlosni stošci

(Il. 2.19)

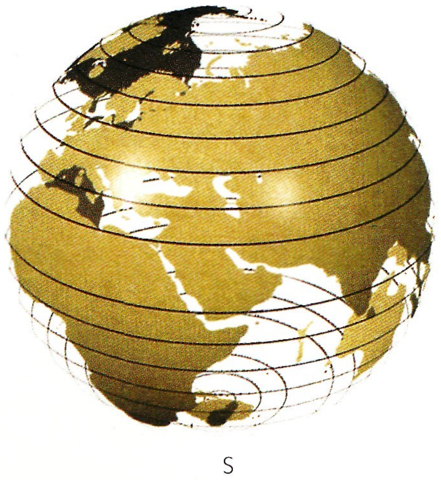
U stvarnom vremenu prostorvremena klasične opće teorije relativnosti vrijeme se razlikuje od prostornih dimenzija po tome što se povećava samo duž povijesti jednog promatrača, za razliku od prostornih dimenzija koje se mogu povećavati ili smanjivati duž te povijesti. S druge strane, dimenzija imaginarnog vremena u kvantnoj teoriji je poput svake druge prostorne dimenzije, tako da se može povećavati ili smanjivati.

Einsteinova klasična (što znači nekvantna) opća teorija relativnosti spaja realno vrijeme i tri dimenzije prostora u četverodimenziono prostorvrijeme. Međutim, pravac realnog vremena razlikuje se od tri prostorna pravca; svjetska crta ili povijest nekog promatrača uvijek se povećava u istom smjeru realnog vremena, a *nikad* se ne smanjuje — promatrač se uvijek giba od prošlosti prema budućnosti. Kad je o prostoru riječ, on uvijek može *birati smjer* gibanja. (il. 2.19).

S druge strane, kako imaginarno vrijeme stoji okomito u odnosu na realno vrijeme, ono se ponaša kao

(IL. 2.20) IMAGINARNO VRIJEME

U imaginarnom prostorvremenu koje je lopta, pravac imaginarnog vremena može se prikazati kao udaljenost od Južnog pola. Kako se napreduje prema sjeveru, krugovi geografske širine na stalnoj udaljenosti od Južnog pola postaju sve veći, što odgovara širenju svemira s protokom imaginarnog vremena. Svemir bi dostigao najveću veličinu na ekvatoru, a zatim bi se počeo smanjivati kako protječe imaginarno vrijeme, sve dok ne završi u jednoj točki na Sjevernom polu. Iako bi svemir imao nultu veličinu na polovima, te točke ne bi bile singularnosti, u istom smislu u kome su Sjeverni i južni pol na površini Zemlje sasvim obične točke. Odavde slijedi da bi nastanak svemira u imaginarnom vremenu mogao biti obična točka u prostorvremenu.

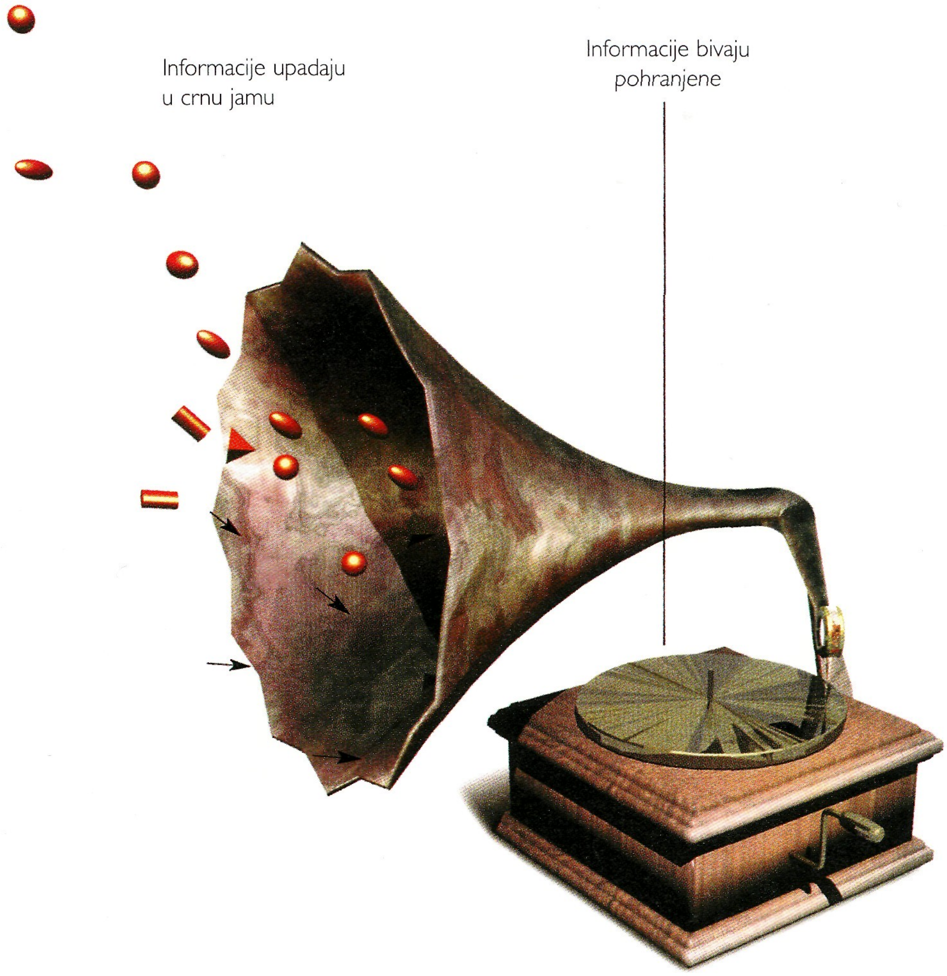


Imaginarno vrijeme kao kružnice geografske širine.

(IL.2.21)

Umjesto stupnjeva geografske širine, pravac imaginarnog vremena u prostorvremenu mogao bi također odgovarati stupnjevima geografske dužine. Budući da se sve kružnice geografske dužine (meridijani) sijeku na Sjevernom i Južnom polu, vrijeme na polovima stoji; povećanjem imaginarnog vremena ostaje se na istoj točki, baš kao što biste, ako biste se zaputili na zapad sa Sjevernog pola, i dalje bili na njemu.

Imaginarno vrijeme kao kružnice geografske dužine koje se skupljaju na Sjevernom i Južnom polu.



Površinska formula za entropiju — ili broj unutrašnjih stanja — crne jame ukazuje na to da informacije o onome što upada u nju mogu biti spremljene kao na gramofonskoj ploči, a zatim reproducirane tijekom isparavanja crne jame.

četvrta prostorna dimenzija. Možemo dakle imati znatno bogatiji raspon mogućnosti negoli željezničke tračnice običnog realnog vremena, koje može imati samo početak ili kraj, ili pak ići u krugu. Upravo u ovom imaginarnom smislu vrijeme ima oblik.

Da bismo ispitali neke mogućnosti, razmotrimo vremenski imaginarno prostorvrijeme koje je oblika lopte, kao površina Zemlje. Zamislimo da je imaginarno vrijeme geografska širina (il. 2.20, v. str. 61). U tom prikazu bi povijest svemira u imaginarnom vremenu počela na Južnom polu. Bilo bi besmisleno pitati "Što je bilo prije početka?" Takva imaginarna vremena jednostavno nisu određena, baš kao što ne postoje ni točke južno od Južnog pola. Južni pol je posve obična točka na površini Zemlje i isti zakoni koji vrijede u njoj također vrijede u bilo kojoj drugoj točki. Iz toga proizlazi da početak svemira u imaginarnom vremenu može biti neka obična točka prostorvremena, odnosno da isti zakoni koji vrijede na početku ostaju na snazi i u ostatku svemira. (O kvantnom porijeklu i razvoju svemira bit će riječi u sljedećem poglavlju.)

Druga mogućnost je zamišljanje da je imaginarno vrijeme geografska dužina. Sve kružnice geografske dužine (meridijani) skupljaju se u Sjevernom i Južnom polu (il. 2.21, v. str. 61). Vrijeme u njima miruje, u smislu da se pri povećanju imaginarnog vremena, odnosno stupnja geografske dužine, ostaje u mjestu. Ovo je vrlo slično načinu na koji obično vrijeme izgleda kao da stoji na obzoru crne jame. Uvidjeli smo da ovo mirovanje realnog i imaginarnog vremena (ili oba stoje ili nijedno) znači da prostorvrijeme ima temperaturu, kao što sam otkrio za crne jame. Ne samo što se crnoj jami može pripisati temperatura nego se ona i ponaša kao da ima drugo svojstvo koje se naziva entropija. Entropija je broj unutarnjih stanja (načina na koji se iznutra može konfigurirati) koje bi crna jama mogla imati, a da pritom ne izgleda nimalo drukčije nekom vanjskom promatraču, koji može izmjeriti samo njenu masu, rotaciju i naboj. Ova entropija crne jame izračunava se vrlo jednostavnom formulom koju sam otkrio 1974. Ona je razmjerna površini obzora crne jame: jedan bit informacija o unutrašnjem stanju crne jame odgovara nekoj osnovnoj jedinici površine obzora. Ovo pokazuje da postoji duboka veza između kvantne gravitacije i termodinamike (koja obuhvaća i entropiju). Sve to upućuje na to da kvantna gravitacija možda pokazuje svojstvo zvano holografija.

$$S = \frac{Akc^3}{4\hbar G}$$

FORMULA ENTROPIJE CRNE JAME

A područje događajnog obzora crne jame

$\hbar$ Planckova konstanta

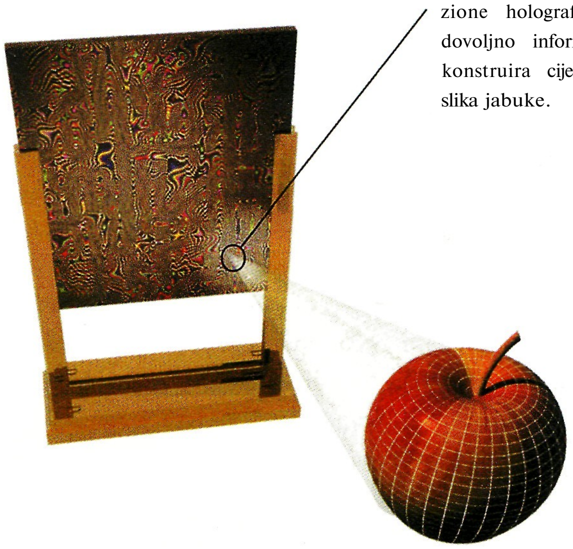
k Boltzmanova konstanta

G Newtonova konstanta gravitacije

c brzina svjetlosti

S entropija

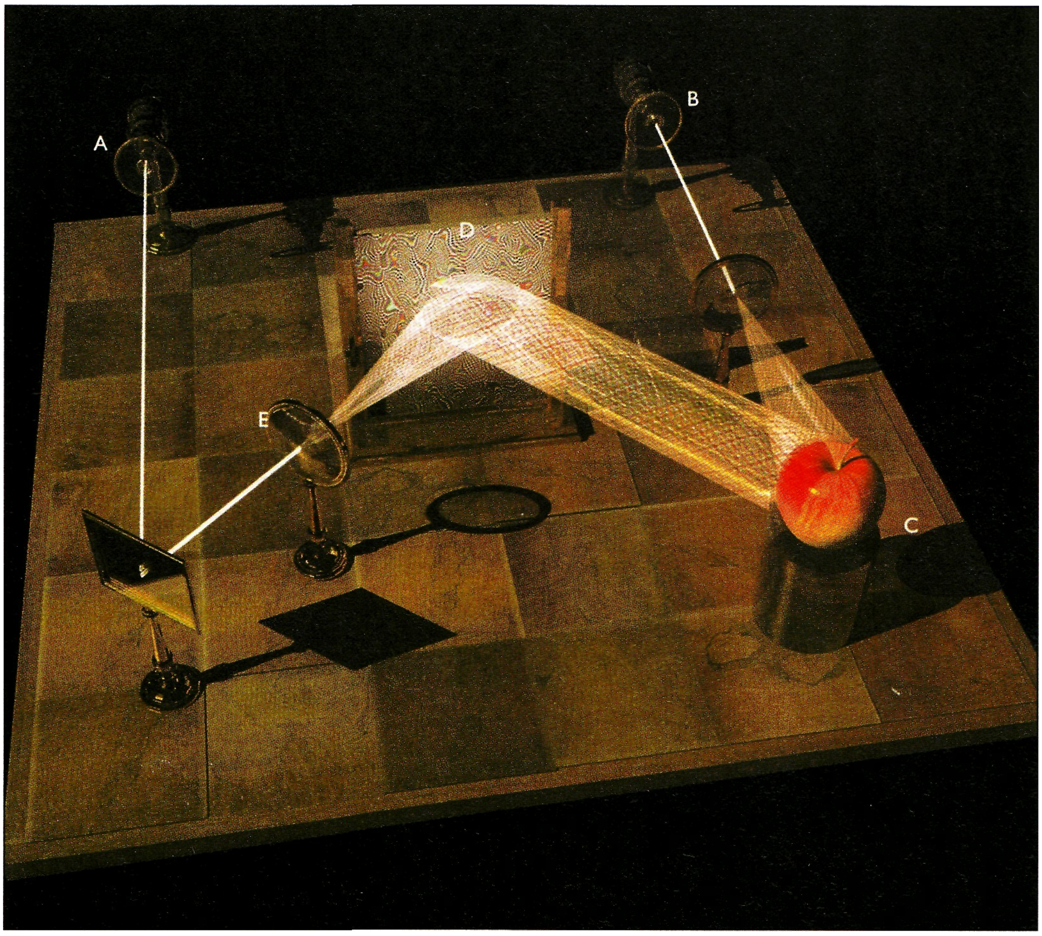
Čak i jedan sitni dio dvodimenzione holografske ploče sadrži dovoljno informacija da se rekonstruira cijela trodimenziona slika jabuke.



NAČELO HOLOGRAFIJE

Spoznaja da je površina obzora koji okružuje crnu jamu mjera njene entropije navela je fizičare na zaključak da najveća entropija bilo kojeg zatvorenog prostora nikada ne može biti veća od četvrtine njegove vanjske površine. Kako entropija nije ništa drugo doli mjera ukupnog informacijskog sadržaja nekog sustava, iz toga slijedi da se informacije vezani uz sve pojave u trodimenzionom svijetu mogu uskladištiti u njegovom dvodimenzionom graničnom području, poput holografske slike. U izvjesnom smislu može se reći da je svijet, zapravo, dvodimenzion.

Informacije o kvantnim stanjima u nekom području prostorvremena mogu biti nekako kodirane na granicu područja koja ima dvije dimenzije manje. Ovo je slično načinu na koji hologram sadrži trodimenzionu sliku na dvodimenzionoj površini. Ako kvantna gravitacija obuhvaća holografsko načelo, to bi moglo značiti da je moguće ući u trag onome što je u unutrašnjosti crnih jama. To je od bitnog značenja želimo li biti u stanju pretkazati zračenje koje dolazi iz crnih jama. Ako to ne možemo, onda ne bi bilo moguće predvidjeti budućnost onako potpuno kako smo to mislili. O ovome će biti riječi u poglavlju 4. O holografiji se ponovno raspravlja u poglavlju 7. Čini se da mi živimo na jednoj 3-brani, dakle jednoj četverodimenzionoj (tri dimenzije prostora plus jedna vremena) površini koja je granica nekog petodimenzionog područja. Stanje ovog branskog svijeta kodira nekom šifrom sadržaj onoga što se događa u petodimenzionom području.



(IL, 2.22) Holografija je u biti pojava koja se temelji na interferenciji valnih uzoraka. Hologrami nastaju kada se svjetlost iz jednog lasera dijeli na dva zasebna snopa (a) i (b). Jedan od njih (b) odbija se od objekta (c) na fotoosjetljivu ploču (d). Drugi (a) prolazi kroz leću (e) i sudara se s odbijenom svjetlošću (b), čime na ploči nastaje interferentni uzorak.

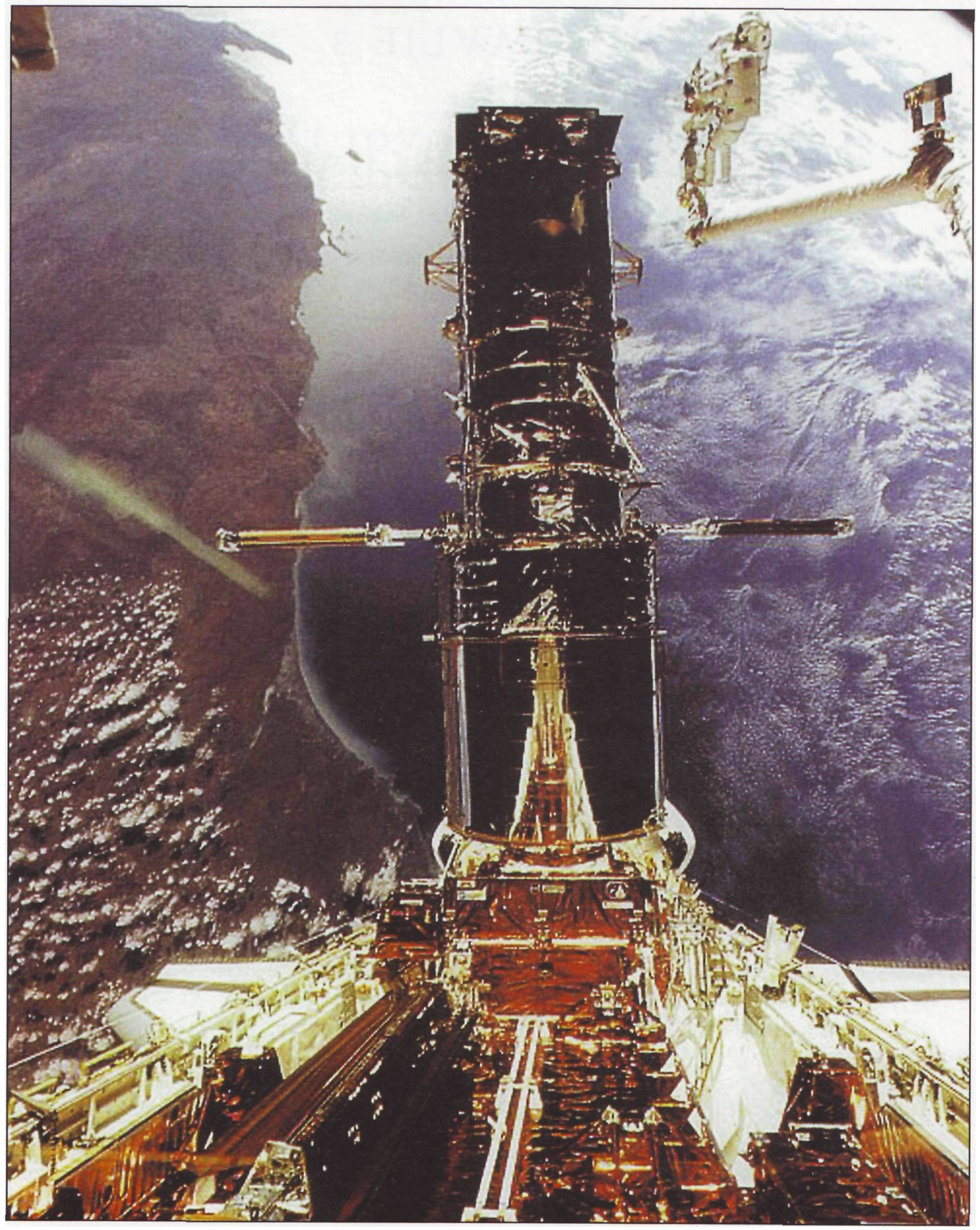
Kada se zatim laser pošalje kroz razvijenu ploču, pojavljuje se puna *trodimenziona* slika objekta. Promatrač može okretati tu holografsku sliku i promatrati sve njezine skrivene strane, koje se na uobičajenoj fotografiji ne bi pokazale.

Dvodimenziona površina ploče (lijevo), za razliku od normalne fotografije, odlikuje se tim izuzetnim svojstvom da svaki njen djelić sadrži sve informacije neophodne za rekonstrukciju cijele slike.

POGLAVLJE 3

SVEMIR U ORAHOVOJ LJUSCI

Svemir ima višestruke povijesti, a svaka od njih određena je majušnim orahom.



Mogao bih biti zatvoren u orahovu ljusku,
i smatrati se kraljem beskrajnog prostranstva.

— Shakespeare,
Hamld, 2. čin, 2. scena

HAMLET JE MOŽDA IMAO NA UMU DA IAKO SMO MI, ljudska bića, u fizičkom pogledu vrlo ograničeni, naši umovi mogu slobodno istraživati čitav svemir i hrabro poći čak i tamo gdje se ne usuđuju ni *Zvjezdane staze* — dopuštajući si i ružne snove..

Je li svemir doista beskonačan ili samo vrlo velik? Također, je li vječan ili samo dugovječan? Kako naši konačni umovi uopće mogu pojmiti beskonačan svemir? Nije li oholo od nas to čak samo i pokušati? Izlažemo li se time opasnosti da nas zadesi sudba mitološkog Prometeja, koji je ukrao vatru od Zeusa da bi je podario ljudima pa je zbog te drskosti bio kažnjen tako što je lancima prikovan za stijenu, gdje mu je orao kljucao utrobu?

Usprkos ovoj opominjućoj priči, moje je mišljenje da možemo i trebamo nastojati shvatiti svemir. Već smo učinili velik napredak u razumijevanju svemira, naročito tijekom posljednjih nekoliko godina. Još nemamo cjelovitu sliku, ali od nje možda više nismo daleko.

Najočiglednija stvar o svemiru je ta da se on prostire unedogled. To su potvrdili najnoviji instrumenti kakav je Hubbleov teleskop koji nam omogućava pogled duboko u svemir. Ono što tamo vidimo su milijarde i milijarde galaktika raznih oblika i veličina (v. str. 70, il. 3.1). Svaka galaktika sadrži stotine milijarda zvijezda, od kojih mnoge imaju planete što kruže oko njih. Živimo na planetu koji kruži oko jedne zvijezde u vanjskom kraku spiralne galaktike Mliječne

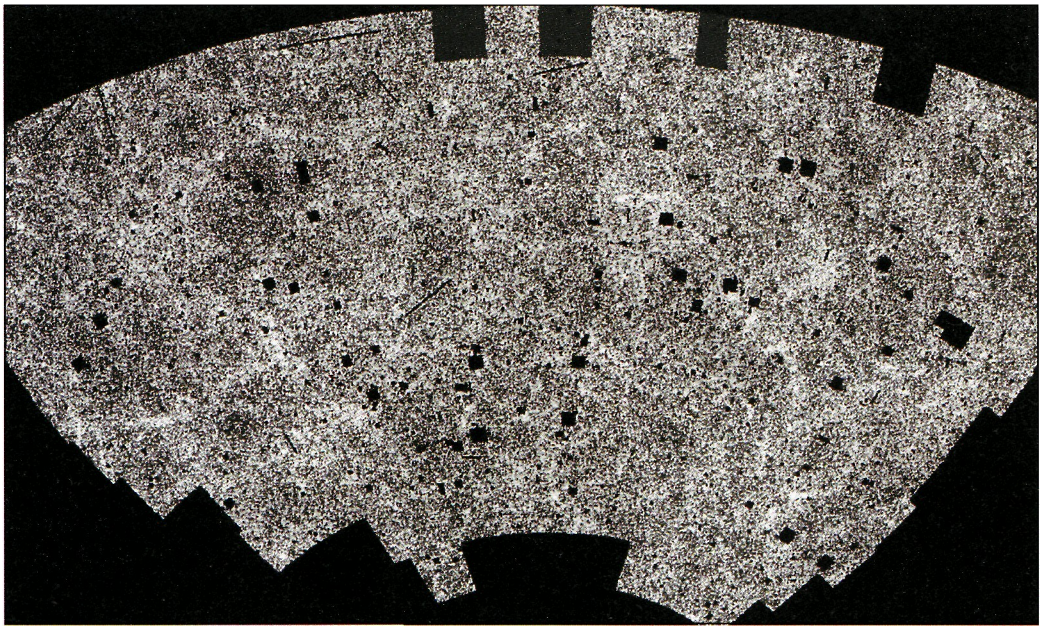
Gore: *Prometej. Slikarija na etruščanskoj vazi, šesto stoljeće p.n.e.*

Lijevo: *Posada svemirskog raketoplana podešava leće i Zrcala svemirskog teleskopa Hubble. Ispod se može vidjeti Australija.*

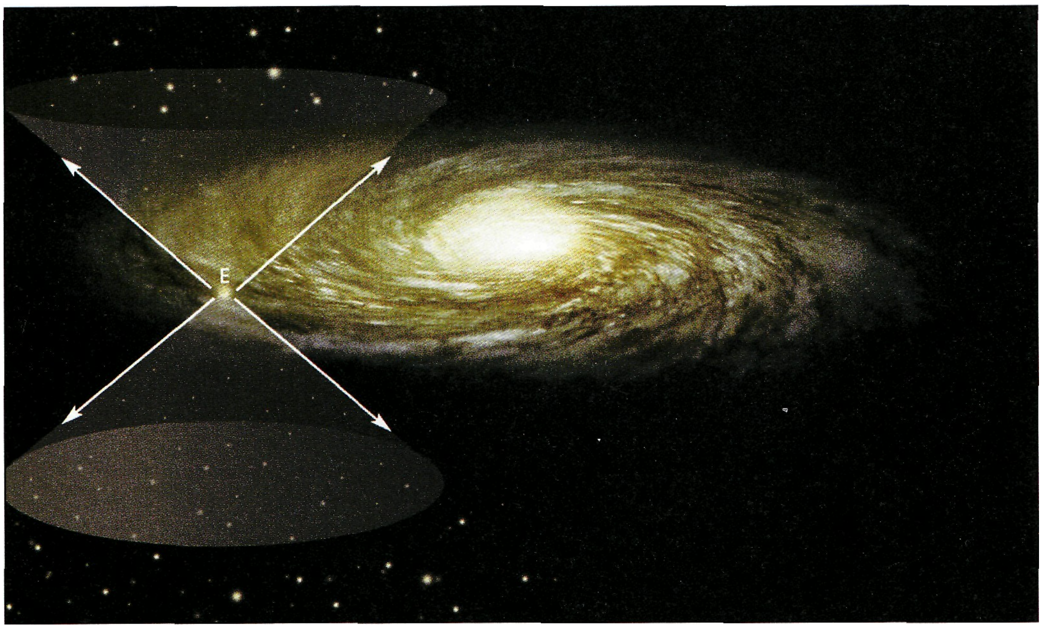
Spiralna galaktika
NGC 4414

Spiralna prečkasta galaktika
NGC 4314

Eliptična galaktika
NGC 147



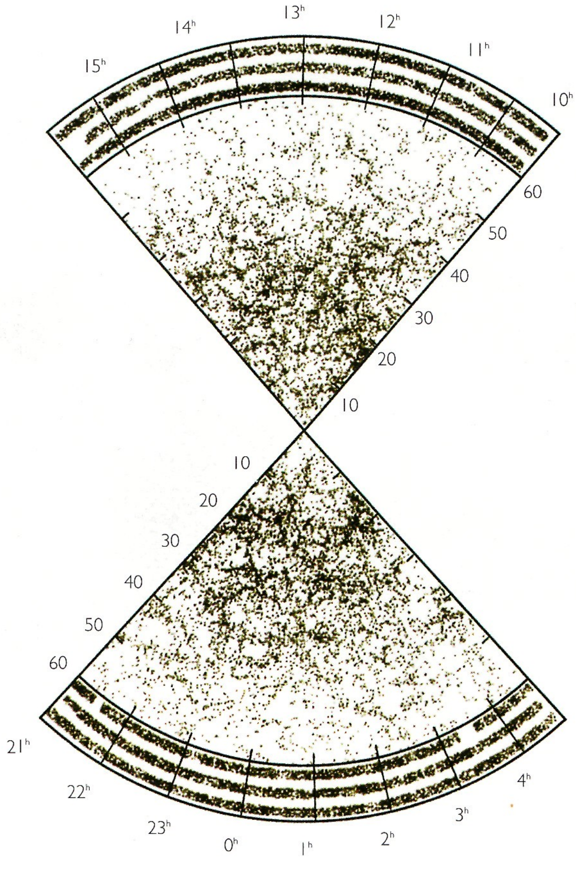
(II 3.1) Kada pogledamo duboko u svemir vidimo milijarde i milijarde galaktika.
Galaktike imaju različite oblike i veličine; mogu biti ili eliptične ili spiralne kakva je naša galaktika Mliječna Staza.



Staze. Prašina u spiralnim kracima zaklanja nam pogled prema područjima u ravnini Galaktike, ali zato nam se pruža jasan vidik u područjima stožaca iznad i ispod ove ravnine, tako da smo u stanju odrediti položaje dalekih galaktika (il. 3.2). Vidimo da su galaktike raspoređene uglavnom ravnomjerno kroz svemir, s mjestimičnim jačim nakupinama i prazninama. Gustoća galaktika čini se da opada na vrlo velikim udaljenostima, ali to je možda stoga što su vrlo daleko pa su slabog sjaja i ne primjećujemo ih. Koliko smo u stanju procijeniti, svemir se prostorno pruža u beskraj (v. str. 72, il. 3.3).

(IL. 3.2)
Naš planet Zemlja (E) kruži oko Sunca u jednom vanjskom području naše spiralne Galaktike. Zvjezdana prašina u spiralnim kracima zaklanja nam vidik u smjeru ravnine Galaktike, ali zato dobro vidimo u smjerovima iznad i ispod te ravnine.

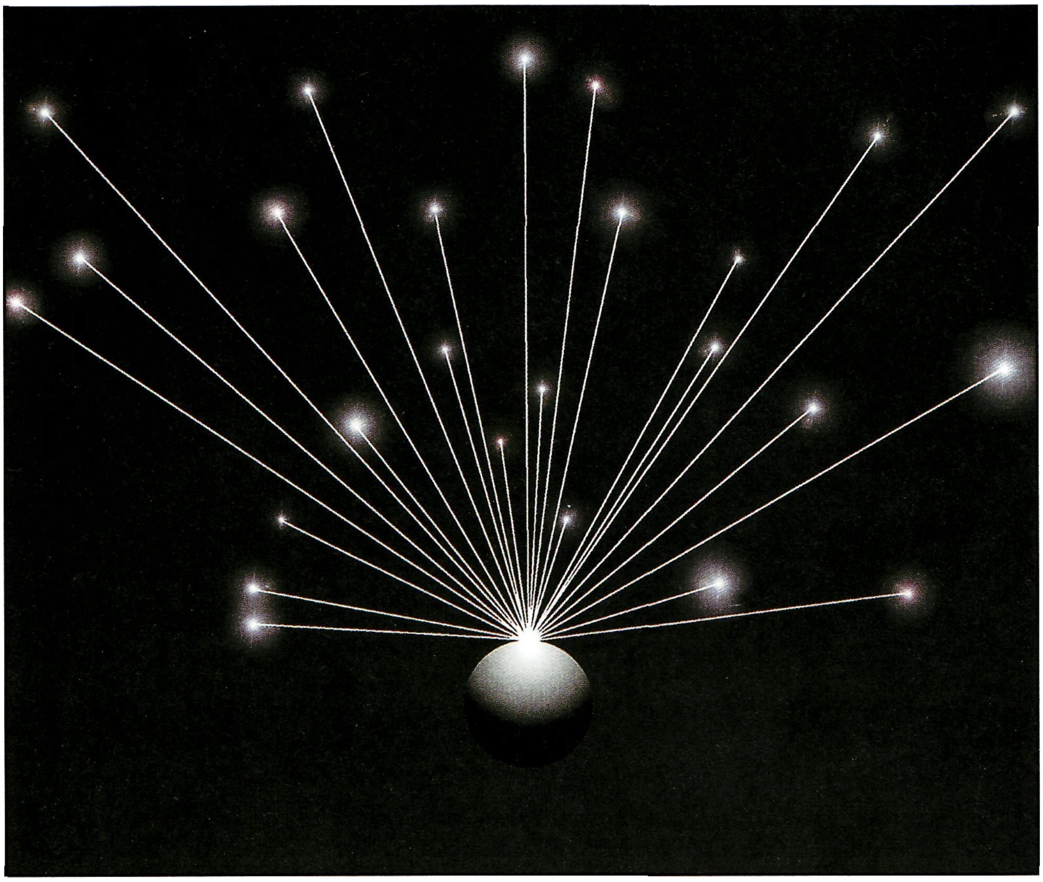
Iako se čini da je svemir uglavnom jednak u svakoj točki prostora, on se nesumnjivo vremenom mijenja. To je ustanovljeno tek početkom dvadesetog stoljeća. Ranije se smatralo da je svemir u biti nepromjenjiv. Možda postoji beskonačno dugo, ali iz toga su slijedili neki besmisleni zaključci. Ako zvijezde zrače beskonačno vrijeme, onda bi zagrijale svemir do vlastite temperature. Čak bi i noću cijelo nebo sjalo poput Sunca zato što bismo, ma kamo god pogledali,



(Il. 3.3)
Izuzmu li se neke mjestimične nakupine, uočavamo da su galaktike razmještene prilično ravnomjerno u prostoru.

vidjeli ili neku zvijezdu ili oblak prašine koji se toliko zagrijao da je postigao temperaturu zvijezda (il. 3.4).

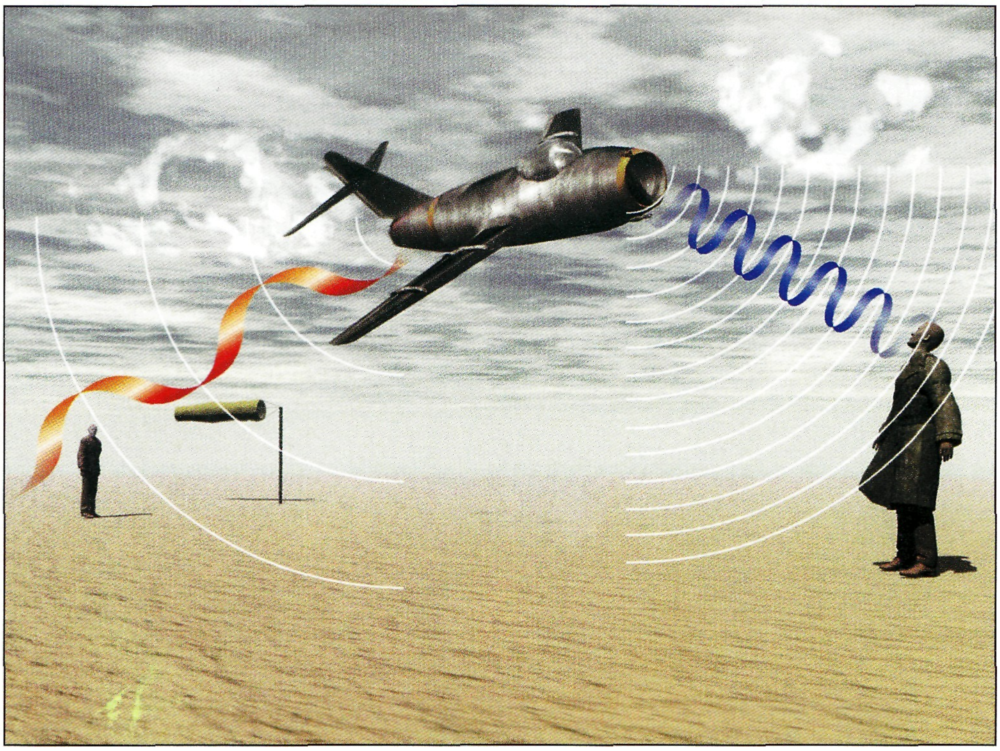
Činjenica koju svi znamo, da je nebo noću mračno, vrlo je važna. Iz nje slijedi da svemir nije mogao vječno postojati u svom sadašnjem stanju. Nešto se moralo dogoditi u prošlosti što je dovelo do toga da zvijezde zasjaju prije nekog vremena, što znači da svjetlost s vrlo dalekih zvijezda još nije uspjela stići do nas. Ovo je objašnjenje činjenice zašto noćno nebo ne blista u svim pravcima.



Ako je zvijezda oduvijek bilo, zašto su onda najednom zasjale prije nekoliko milijarda godina? Kakva im je to ura naredila da bijesnu? Kao što smo vidjeli, ovaj problem zadavao je glavobolje filozofima, poput Immanuela Kanta, koji su smatrali da je svemir oduvijek postojao. Ali većina ljudi bila je uvjerena da je svemir nastao, uglavnom u svom sadašnjem obliku, prije samo nekoliko tisuća godina.

Nove zamisli počele su se pojavljivati u trećem desetljeću dvadesetog stoljeća, kao rezultat istraživanja Vestoa Sliphera i Edwina Hubblea. Godine 1923. Hubble je otkrio da su mnoge slabašne mrlje svjetlosti, nazvane nebule, zapravo druge galaktike, ogromni

(Il. 3.4)
Da je svemir statičan i beskonačan u svim smjerovima, u koju god točku da pogledamo vidjeli bismo neku zvijezdu, tako da bi noćno nebo blistalo poput dnevnoga.



DOPPLEROV UČINAK

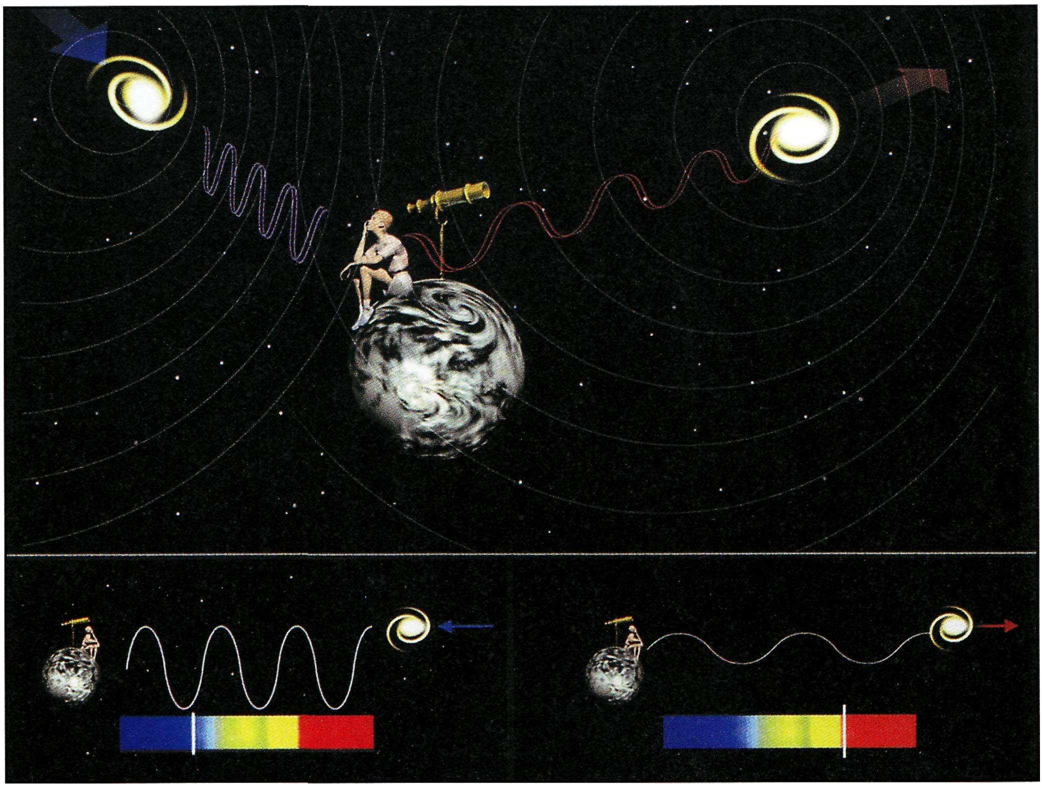
Odnos između brzine i valne dužine, koji se zove Dopplerov učinak, svakodnevno je iskustvo.

Slušajte zvuk zrakoplova koji prelijeće iznad vas; kako vam se približava, buka njegovog motora zvuči viša, a dok se udaljava postaje niža.

Viši zvuk odgovara zvučnim valovima kraće valne dužine (udaljenost između dvaju susjednih bregova vala) i više frekvencije (broj valova u sekundi).

Ova se pojava očituje tako zato jer će vam zrakoplov, kad leti prema vama, biti bliži u trenutku emitiranja sljedećeg brijega vala, čime se smanjuje razmak između dvaju bregova.

Slično tome, kako se letjelica udaljava, valna dužina se povećava pa je i zvuk dublji.



skupovi zvijezda sličnih našem Suncu, samo na velikoj udaljenosti. Te zvijezde izgledaju su tako slabog sjaja jer je udaljenosti do njih tolika da je njihovoj svjetlosti potrebno više milijuna ili čak milijarde godina da stigne do nas. To znači da se početak svemira nikako nije mogao zbiti prije samo nekoliko tisuća godina.

Ali drugo Hubbleovo otkriće bilo je još značajnije. Astronomi su naučili kako će analizom svjetlosti s drugih galaktika ustanoviti približavaju li nam se one ili se udaljavaju od nas (il. 3.5). Na njihovo veliko iznenađenje, zaključili su da se gotovo sve galaktike udaljavaju od nas. Štoviše, što su dalje od nas, to se brže udaljavaju. Hubble je bio taj koji je shvatio dramatične implikacije ovog otkrića:

(Il. 3.5)
Dopplerov učinak zamjetljiv je i za svjetlosne valove. Da je neka galaktika na stalnoj udaljenosti od Zemlje, karakteristične linije u spektru nalazile bi se na svojim točno određenim standardnim mjestima. Budući da se ona, međutim, udaljava od nas, njeni svjetlosni valovi izgledat će izduženi ili razvučeni, a karakteristične spektralne linije pomaknute prema crvenom kraju (desno). Kada se, pak galaktika giba prema nama, onda njeni valovi izgledaju zbijeniji, a spektralne linije pomaknute su prema plavome kraju (lijevo).

Naš galakiički susjed, Andromedina maglica, čiju su udaljenost izmjerili Hubble i Slipher.

KRONOLOGIJA OTKRIĆA SLIPHERA I HUBBLEA IZMEĐU 191 0. I 1930.

1912. — Slipher mjeri svjetlost sa četiri maglice i ustanovljuje crveni pomak kod tri, ali plavi kod Andromede. Došao je do zaključka da nam se Andromeda približava, dok se ostale maglice udaljavaju.

1912-1914. - Slipher mjeri još 12 maglica. Samo jedna medu njima nema crveni pomak.

1914. — Slipher izvještava o svome otkriću na jednom skupu Američkog astronomskog društva. Hubble je čuo izlaganje.

1918. — Hubble počinje istraživati maglice.

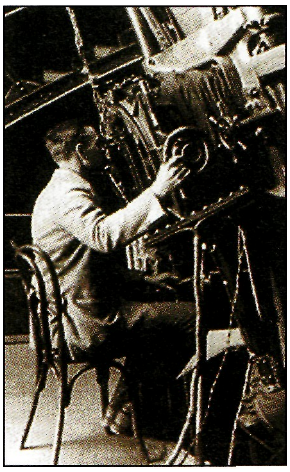
1923. — Hubble ustanovljuje da su spiralne maglice (uključujući i Andromedu) druge galaktike.

1914-1925.-Slipher i drugi mjere Dopplerove pomake. Zaključno sa 1925. zabilježili su 43 crvena i 2 plava pomaka.

1929. - Hubble i Milton Humason, nakon što su nastavili mjeriti Dopplerove pomake, ustanovljuju da, u velikim razmjerima, izgleda kao da se svaka galaktika udaljava od svih ostalih - objavljuju svoje otkriće da se svemir širi.

u velikim razmjerima, svaka galaktika udaljava se od svih ostalih. Svemir se širi (il. 3.6).

Otkriće o širenju svemira jedna je od najvećih znan-stvenih revolucija dvadesetoga stoljeća. Bilo je to potpuno iznenađenje koje je iz temelja promijenilo tijek rasprava o nastanku svemira. Ako se galaktike udaljuju, onda znači da su u prošlosti morale biti bliže jedna drugoj. Na temelju sadašnje brzine širenja može se iz- računati da su bile znatno zbijenije prije deset do petnaest milijardi godina. Kao što je opisano u posljednjem poglavlju, Roger Penrose i ja pokazali smo da iz Einsteinove opće teorije relativnosti slijedi da su svemir i samo vrijeme morali imati početak u ogromnoj eksploziji. Bilo je to objašnjenje činjenice da je noćno



Edwin Hubble 1930. za 2,5-metarskim teleskopom na Mount Wilsonu.

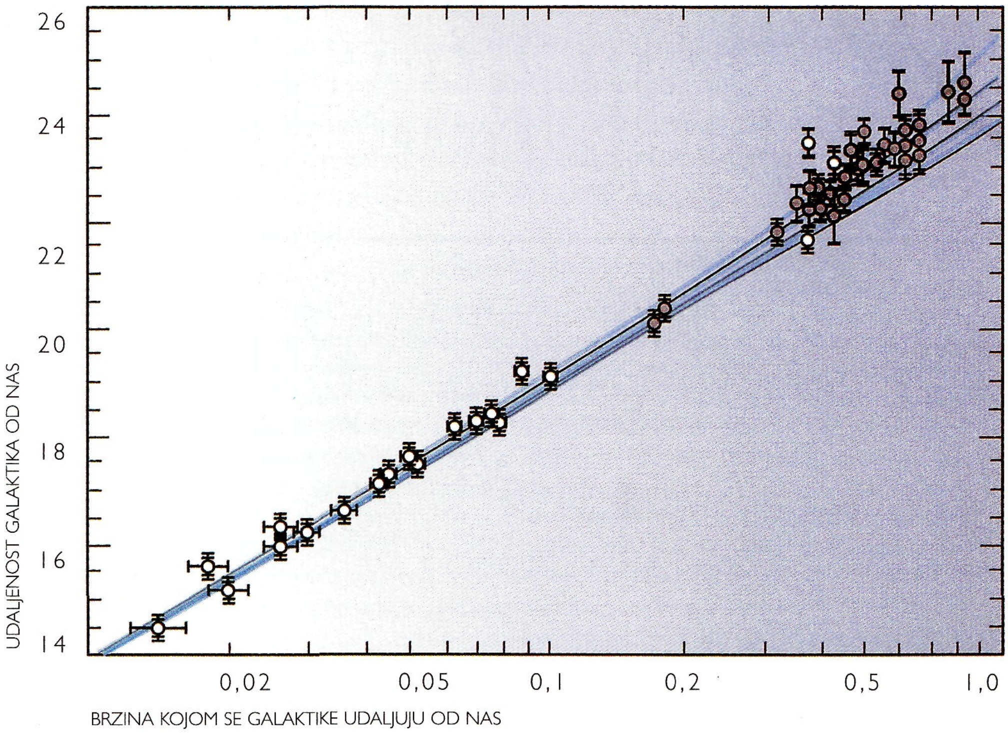
(IL. 3.6) HUBBLEOV ZAKON

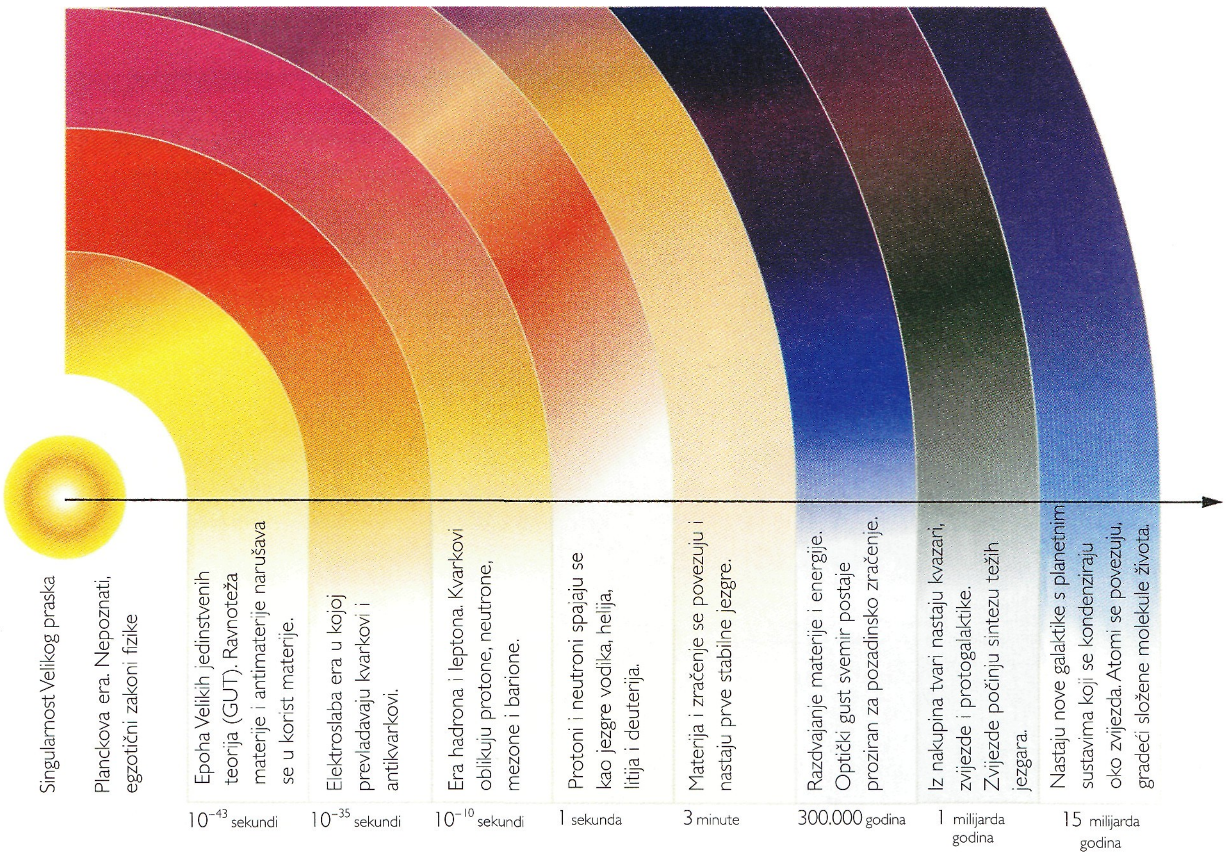
Analizirajući svjetlost s drugih galaktika, Edwin Hubble otkrio je dvadesetih godina prošlog stoljeća da se gotovo sve galaktike udaljavaju od nas brzinom V koja je razmjerna njihovoj udaljenosti R od Zemlje, tako da je V = HxR

Iz ovog važnog zapažanja, poznatog kao Hubbleov zakon, proizlazi da se svemir širi, pri čemu Hubbleova konstanta H daje brzinu širenja.

Na donjem dijagramu prikazani su noviji rezultati promatranja crvenih pomaka galaktika, koji potvrđuju Hubbleov zakon za velike udaljenosti od nas.

Blaga zakrivljenost krivulje nagore kod velikih udaljenosti upućuje na to da se širenje ubrzava, možda pod utjecajem energije vakuuma.





VRUĆI VELIKI PRASAK

Ako je opća teorija relativnosti točna, svemir je počeo iz beskonačno visoke temperature i gustoće singulamosti Velikog praska. Kako se širio, temperatura i zračenje su opadali. Otprilike jednu stotinku sekunde nakon Velikog praska temperatura je iznosila 100 milijarda stupnjeva, a svemir se sastojao uglavnom od fotona, elektrona i neutrina (vrlo lakih čestica), kao i njihovih antičestica, uz nešto protona i neutrona. Tijekom sljedeće tri minute, kako se svemir ohladio do oko milijardu stupnjeva, protoni i neutroni počeli su se povezivati, gradeći jezgre helija, vodika i ostalih lakih elemenata.

Stotinama tisuća godina kasnije, kada je temperatura pala na samo nekoliko tisuća stupnjeva, brzina elektrona se dovoljno smanjila da su ih lake jezgre mogle hvatati i zarobiti u atome. No, teži elementi, od kojih smo mi građeni, kao ugljik i kisik, nastat će tek milijardama godina kasnije fuzijom helija u središtima zvijezda.

Ovu zamisao o gustoj i toploj ranoj fazi svemira prvi je izložio George Gamov ! 948. u jednom radu, zajedno s Ralphom Alpherom. Tu se javilo i važno predviđanje da bi zračenje iz te vrlo tople rane faze trebalo postojati još i danas. Predviđanje je potvrđeno 1965, kada su fizičari Amo Penzias i Robert Wilson zabilježili kozmičko mikrovalno pozadinsko zračenje.

nebo mračno: nijedna zvijezda nije mogla sjati duže od deset do petnaest milijardi godina, koliko je proteklo od Velikog praska.

Navikli smo da događaje uzrokuju raniji događaji koje su, opet, uzrokovali još raniji događaji. Postoji lanac uzročnosti koji se pruža u prošlost. Ali zamislimo da taj lanac ima početak. Zamislimo da postoji prvi događaj. Što je njega uzrokovalo? To nije omiljeno pitanje medu znanstvenicima. Oni uglavnom nastoje izbjegavati ga, bilo tako što će, poput već spomenutih Rusa, tvrditi da svemir nije imao početak, ili tako što će smatrati da pitanje nastanka svemira ne spada u znanost već u metafiziku ili religiju. Prema mom mišljenju, ovo nije gledište kakvo bi trebao zastupati istinski znanstvenik. Ako su prirodni zakoni na početku svemira stavljeni izvan snage, zar onda nisu mogli zakazati i nekom drugom prigodom? Jedan zakon nije zakon ako vrijedi samo povremeno. *Moramo nastojati proniknuti u početak svemira uz pomoć znanstvenih metoda. Možda taj zadatak nadmašuje naše snage, ali trebali bismo barem pokušati.*

Teoremi koje smo Penrose i ja dokazali, pokazali su, doduše, da svemir mora imati početak, ali nisu nam dali mnogo informacija o prirodi tog početka. Iz njih je slijedilo da je svemir počeo u Velikom prasku — točki u kojoj su čitav svemir i sve u njemu bili sabijeni do beskonačne gustoće. U toj točki Einsteinova teorija zakazuje i ne može se upotrijebiti za predviđanje načina na koji je svemir počeo. Odavde na prvi pogled proizlazi da nastanak svemira leži izvan okvira prirodnih znanosti.

To nije zaključak koji može zadovoljiti znanstvenika. Kao što je istaknuto u prvom i drugom poglavlju, razlog zakazivanja teorije relativnosti blizu Velikog praska je taj što ona ne uključuje u sebe načelo neodređenosti, element slučajnosti kvantne teorije kojeg Einstein nije prihvatio, smatrajući da se Bog ne kocka. Svi nalazi, međutim, upućuju na to da je Bog i te kakav kockar. Svemir se, zapravo,

može zamisliti kao divovski kasino u kojeg se u svakoj prigodi bacaju kocke i okreće rulet (il. 3.7). Može vam se učiniti daje vođenje kasina vrlo rizičan posao zato što se izlažete opasnosti da izgubite novac kad se bace kocke ili zavrti rulet. Ali poslije velikog broja bacanja i vrtnji ruleta, dobitci i gubitci se uglavnom ujednačuju te daju ishod koji se može predvidjeti, za razliku od ishoda pojedinačnih igara koji se ne mogu predvidjeti. Vlasnici kasina uvode takva pravila da ovaj ishod bude uvijek u njihovu korist. Zato su ti ljudi toliko bogati. Jedini način da dobijete u igri protiv njih je da uložite sav novac u samo nekoliko bacanja kocke ili vrtnji ruleta.

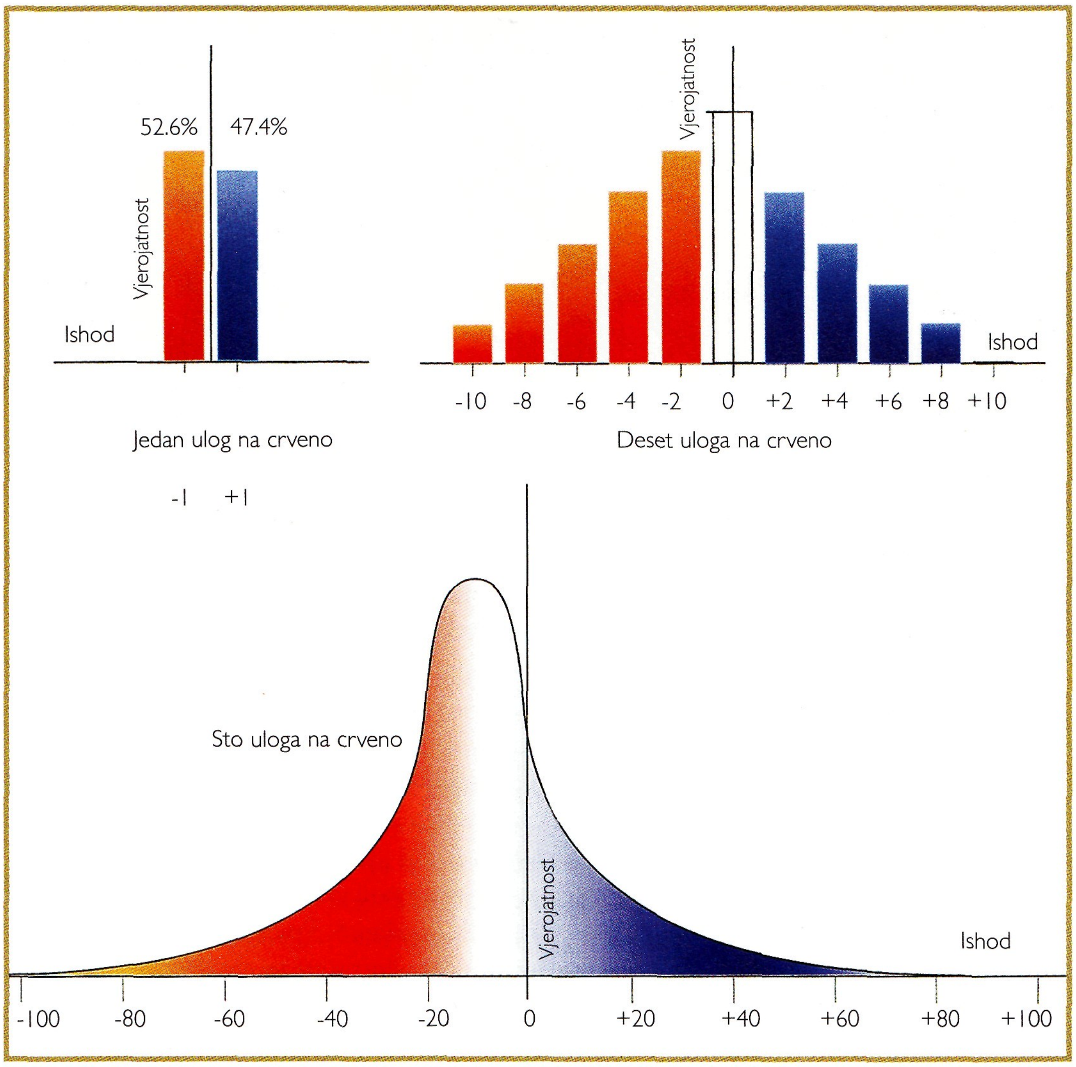
(IL 3.7, gore, i IL 3.8, stranica 81)
Ako igrač na ruletu stavlja uloge na crveno mnogo puta, može se prilično točno predvidjeti ishod, zato što se učestalost padanja kuglice na crvene i crne brojeve izjednačava.
Naprotiv, nemoguće je predvidjeti ishod pojedinačnog pada kuglice.

Isto vrijedi i za svemir. Kada je veliki, kao što je to danas, broj bacanja kocke također je vrlo veliki, a ishodi se ujednačuju pa da ih je moguće predvidjeti. To je razlog zašto klasični zakoni vrijede u velikim sustavima. Ali kada je svemir sasvim malen, kakav je bio u vrijeme Velikog praska, imamo samo malen broj bacanja kocki, a načelo neodređenosti postaje vrlo važno.

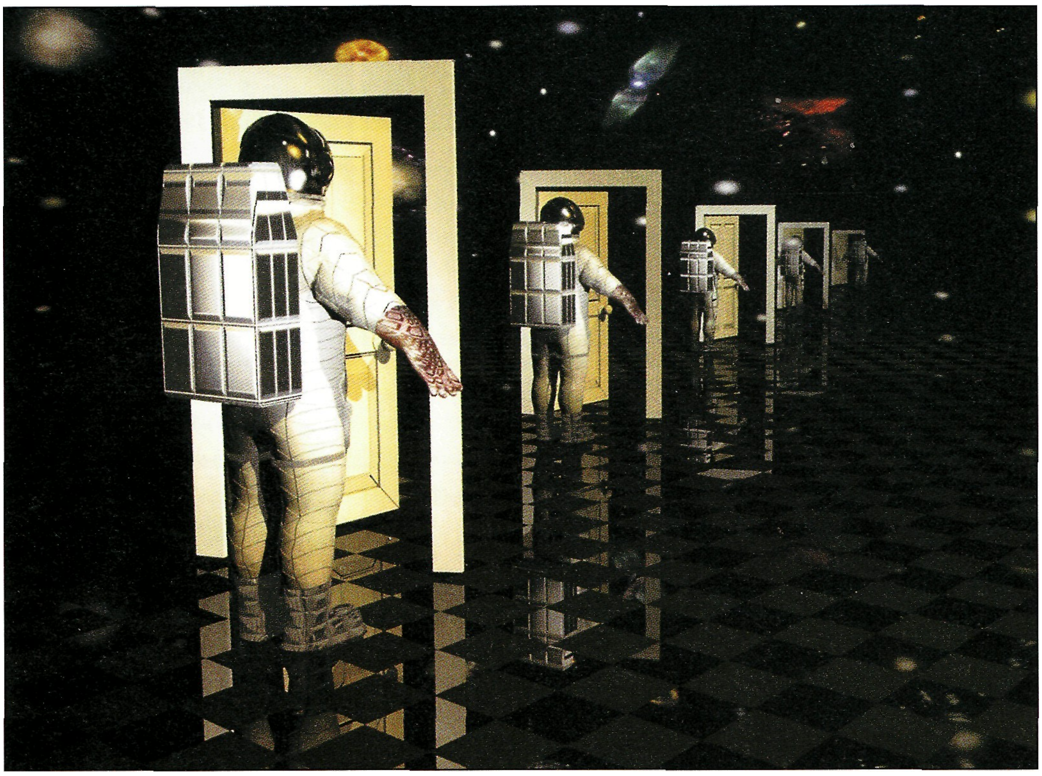
Budući da se svemir i dalje kocka kako bi vidio što će se sljedeće dogoditi, on nema samo jednu povijest, kako bi se moglo pomisliti, već svaku iole moguću povijest, svaku s njenom vlastitom vjerojatnošću. Mora biti i takve povijesti svemira u kojoj je Belize osvojio sva zlatna odličja na Olimpijskim igrama, iako je možda njena vjerojatnost vrlo, vrlo mala.

Zamisao da svemir ima mnoštvo povijesti možda zvuči kao znanstvena fantastika, ali spada potpuno u okvire ozbiljne znanosti. Formulirao ju je Richard Feynman koji je bio ne samo veliki fizičar nego i velik čovjek.

Sada radimo na povezivanju Einsteinove opće teorije relativnosti i Feynmanove zamisli o višestrukim povijestima u cjelovitu jedinstvenu teoriju koja će opisati sve što se događa u svemiru. Ova jedinstvena teorija omogućit će nam da izračunamo kako će se svemir razvijati, pod uvjetom da znamo kako su povijesti počele. Ali jedinstvena teorija neće nam sama reći kako je svemir počeo, niti kakvo je bilo njegovo početno stanje. Za to su nam potrebni takozvani granični uvjeti, pravila koja bi nam rekla što se zbiva na granicama svemira, na rubovima prostora i vremena.



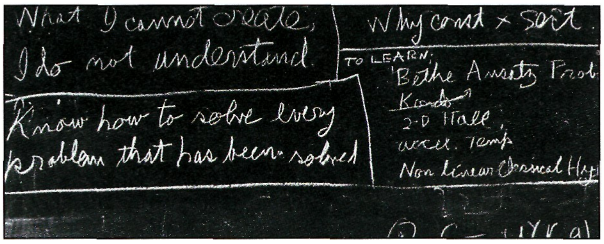
52.6%
47.4%
Vjerojatnost
Ishod
-1
+1
Jedan ulog na crveno
Vjerojatnost
Ishod
-10 -8 -6 -4 -2 0 +2 +4 +6 +8 +10
Deset uloga na crveno
Sto uloga na crveno
Vjerojatnost
Ishod
-100 -80 -60 -40 -20 0 +20 +40 +60 +80 +100



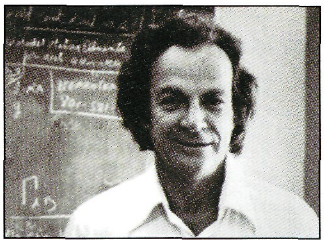
Da je početni rub svemira bila jednostavno neka točka u prostorvremenu, mogli bismo neprestano širiti granice.

Kad bi granica svemira bila neka normalna točka prostora i vremena, mogli bismo prijeći preko nje i proglasiti područje s druge strane kao dio svemira. No, ako je granica svemira neka vrsta reza, poderotine, područje gdje su prostor i vrijeme sabijeni do beskrajne gustoće, bilo bi vrlo teško odrediti suvisle granične uvjete.

Jedan moj kolega, po imenu Jim Hartle, i ja otkrili smo, međutim, da postoji i treća mogućnost. Možda svemir uopće ni nema granica u prostoru i vremenu. Na prvi pogled ovo kao da izravno proturječi teoremima koje smo Penrose i ja dokazali i koji pokazuju da svemir mora imati početak, granicu u vremenu. No, kao što je objašnjeno u drugom poglavlju, postoji još jedna vrsta vremena, takozvano imaginarno vrijeme, koje stoji pod pravim kutom u odnosu na obično realno vrijeme, čiji tijek osjećamo. Povijest svemira u realnom vremenu određuje njegovu povijest u imaginarnom vremenu i obrnuto, ali ove dvije povijesti mogu biti vrlo različite. Svemir, na primjer, ne mora imati početak ili kraj u imaginarnom vremenu.



Ploča predavaonice na Caltechu u vrijeme Feynmanove smrti !988.



Richard Feynman.

FEYNMANOVE POVIJEST]

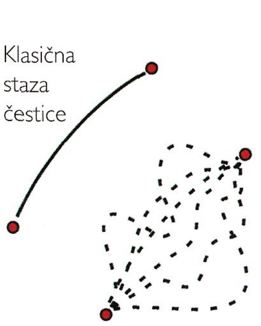
Rođen u Brooklinu, u NewYorku, 1918, Richard Feynman doktorirao je 1942. kod Johna Wheelera na Sveučilištu Princeton. Ubrzo zatim, uključen je u "Projekt Manhattan".Tu je postao poznat, kako po svojoj izuzetnoj ličnosti tako i po neslanim šalama koje je pravio — u laboratorijima Los Alamosa uživao je u razbijanju šifri za sefove gdje su se čuvale strogo povjerljive tajne; no, iznad svega bio je sjajan fizičar: postao je ključni čovjek u teoriji nuklearne bombe. Feynmanova neutaživa radoznalost o svijetu bila je u samoj srži njegovoga bića. Ona ne samo što je bila generator njegove znanstvenike uspješnosti već ga je dovela i do mnogih nevjerojatnih uspjeha, kakvo je bilo dešifriranje hijeroglifa Maya.

U godinama poslije drugog svjetskog rata Feynman je utemeljio novi koristan pristup kvantnoj mehanici, za što je dobio Nobelovu nagradu 1965. Doveo je u sumnju temeljnu klasičnu pretpostavku da se svaka čestica može prikazati na samo jedan način, odnosno kao da ima jednu jedinu povijest. Umjesto toga, predložio je hipotezu da čestica na svome putovanju s jednog mjesta u drugo ide kroz prostorvrijeme po svim mogućim stazama, drugim riječima: proživljava sve moguće povijesti. Svakoj stazi Feynman je pripisao dva broja; jedan za veličinu — amplitudu - vala, a drugi za njegovu fazu - je li na brijegu ili u dolu. Vjerojatnost da neka čestica dođe iz A u B izračunava se zbrajanjem svih valova, vezanih za svaku moguću stazu koja vodi od A do B.

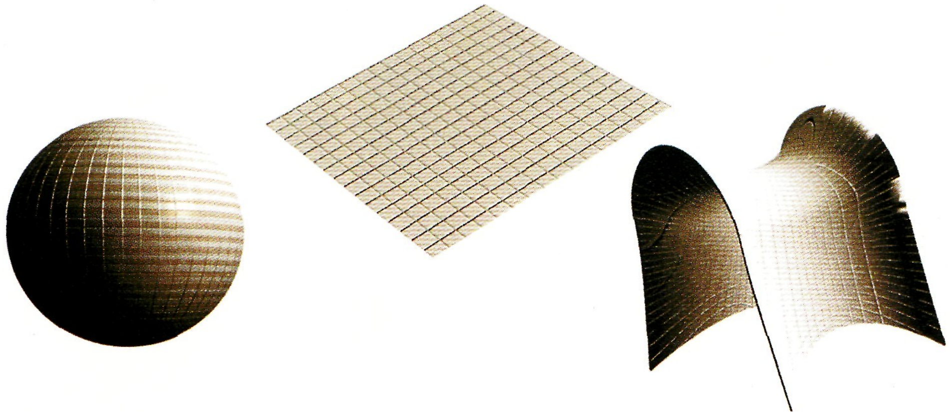
Ipak, u svakodnevnom životu imamo dojam da se predmeti gibaju samo jednom stazom od polazišta do odredišta. Ovo se slaže s Feynmanovom zamisli o višestrukim prikazima povijesti (ili zbroju preko svih povijesti), zato što kod velikih tijela njegovo pravilo pripisivanja vrijednosti svakoj stazi dovodi do toga da se sve one osim jedne međusobno poništavaju. Pri gibanju makroskopskih tijela broji se samo jedna od beskonačno mnogo mogućih staza, a ta staza je upravo ona koja proizlazi iz Newtonovih klasičnih zakona gibanja.

Imaginarno vrijeme ponaša se, zapravo, kao jedan od pravaca prostora. Stoga se povijesti svemira u imaginarnom vremenu mogu prikazati kao zakrivljene površine, kakve su lopta, ravnina ili sedlo, ali sa četiri dimenzije umjesto dvije (v. ilustraciju 3.9 na str. 84).

Ako bi se prikazi povijesti svemira produžili do beskonačnosti u obliku sedla ili ravnine, javio bi se problem postavljanja rubnih uvjeta u beskonačnosti. Ali potreba za rubnim uvjetima može se potpuno izbjeći ako su povijesti svemira u imaginarnom vremenu bezrubne, zatvorene površine kakva je površina Zemlje. Površina Zemlje nema nikakvih granica ili rubova. Ne raspolažemo s pouzdanim izvještajima o tome da je itko negdje ikada pao preko ruba Zemlje.



U Feynmanovom linijskom integralu čestica zauzima svaku moguću stazu.



(IL. 3.9) MODELI SVEMIRA

U sedlastom modelu svemira javlja se problem određivanja graničnih uvjeta u beskonačnosti. U modelu svemira koji je u imaginarnom vremenu zatvorene površine poput Zemlje, uopće ne bi postojali granični uvjeti.

ZAKONI RAZVOJA I POČETNI UVJETI

Zakoni fizike propisuju kako se početno stanje razvija tijekom vremena. Ako bacimo kamen u zrak, na primjer; zakoni gravitacije točno će opisati njegovo gibanje.

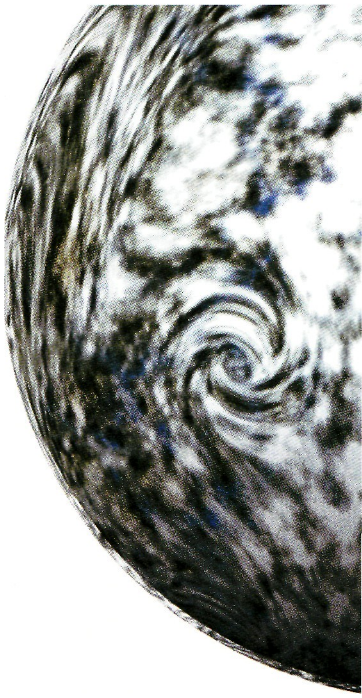
Ali ne možemo predvidjeti gdje će kamen pasti samo iz tih zakona. Potrebno nam je znati također njegovu brzinu i pravac u trenutku kad nam izlijeće iz ruke. Drugim riječima, moramo znati početne uvjete — granične uvjete — gibanja kamena.

Kozmologija pokušava opisati razvoj cijelog svemira koristeći zakone fizike. Moramo se stoga zapitati kakvi su bili početni uvjeti svemira na koje moramo primijeniti te zakone.

Početno stanje moglo je imati velik utjecaj na temeljna svojstva svemira, možda čak i na svojstva elementarnih čestica i sila koje su bile ključne za razvoj biološkog života.

Jedan od prijedloga je *ne-granica* uvjet, a ta hipoteza znači da su vrijeme i prostor konačni, da oblikuju zatvorenu površinu bez granica, baš kao što je površina Zemlje konačna u veličini, ali nema granica. Ova ne-granica hipoteza zasniva se na Feynmanovoj zamisli o višestrukim povijestima, ali umjesto jedne čestice, u Feynmanovom zbroju preko svih prikaza povijesti tu je cjelokupno prostorvrijeme koje predstavlja povijest cijelog svemira. Ne-granica uvjet upravo je ograničenje mogućih povijesti svemira na ona prostorvremena koja nemaju granica u imaginarnom vremenu. Drugim riječima, granični je uvjet svemira da on nema granica.

Kozmolozi sada ispituju je li vjerojatno da će se iz početnih konfiguracija, koje su suglasne s uvjetom ne-granica, možda i zajedno sa slabim antropskim načelom, razviti svemir sličan ovome kakvog vidimo.

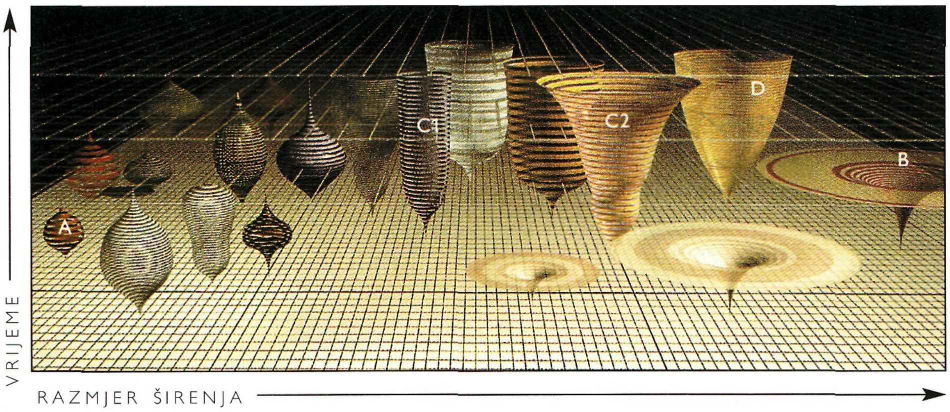


Ako su prikazi povijesti svemira u imaginarnom vremenu doista zatvorene površine, kako smo to Hartle i ja pretpostavili, onda bi to imalo bitne posljedice po filozofiju i predodžbu o našem podrijetlu. Svemir bi tada bio potpuno samodovoljan; ne bi mu bilo potrebno ništa izvana da navije mehanizam i pusti ga u pogon. Umjesto toga, sve bi u svemiru bilo određeno zakonima znanosti i bacanjem kocki u njemu samome. Ovo možda djeluje oholo, ali ja i mnogi drugi znanstvenici vjerujemo u to.

Čak i ako je granični uvjet svemira taj da nema granica, on ipak ne bi imao samo jednu povijest. Naprotiv, postojale bi mnoge povijesti, kako je to izložio Feynman. Svakoj mogućoj zakrivljenoj površini odgovara jedna povijest u imaginarnom vremenu, a svaka povijest u imaginarnom vremenu određuje jednu povijest u stvarnom vremenu. Dobiva se, dakle, supermnoštvo mogućnosti za svemir. Što je to što izdvaja ovaj poseban svemir, u kome mi živimo, iz skupa svih mogućih svemira? Prije svega, može se uočiti da mnoge od mogućih povijest svemira ne pretpostavljaju proces nastanka galaktika i zvijezda, što je od bitne važnosti za naš nastanak i razvoj. Premda nije isključeno da se inteligentna bića mogu razviti i bez galaktika i zvijezda, to ipak izgleda dosta nevjerojatno.

Stoga je već sama činjenica da postojimo mi, kao bića koja mogu postavljati pitanje "Zašto je svemir ovakav kakav je?", ograničenje koje se postavlja pred povijest u kojoj živimo. Odavde slijedi da naša povijest spada u manjinu onih povijesti koje imaju galaktike i zvijezde. Riječ je o primjeru onog što

Površina Zemlje nema granica ili rubova. Izvještaji o ljudima koji su pali sa Zemlje čini se da nisu vjerodostojni.



ANTROPSKO NAČELO

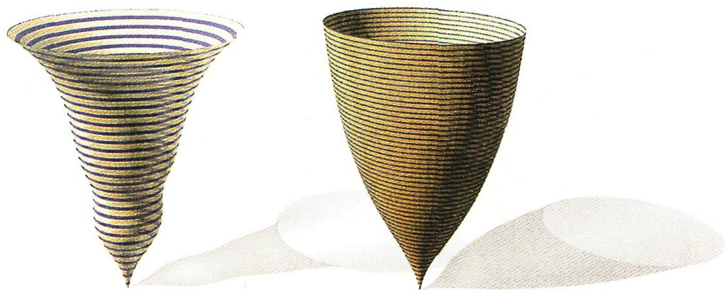
Grubo govoreći, antropsko načelo izriče da svemir vidimo ovakvim kakav je, barem djelomično, zato što postojimo, jer mi u drukčije uređenom svemiru uopće ne bismo postojali, pa takav svemir ne bismo ni mogli promatrati. Ovo gledište u potpunoj je opreci sa snom o potpunoj objedinjenoj teoriji u kojoj su zakoni prirode potpuni, događaji predvidivi i u kojoj je svijet takav kakav je zato što ne može biti drukčiji. Postoji više različitih verzija antropskog načela, u rasponu od onih koje su tako slabe da su trivijalne do onih koje su tako jake da su besmislene. Iako mnogi istraživači ne prihvaćaju jaku verziju antropskog načela, malo je onih koji će osporiti korisnost nekih argumenata slabe verzije.

Slabo antropsko načelo odnosi se na tumačenje toga koja bismo doba ili dijelove svemira mogli nastanjivati. Na primjer, razlog zbog kojeg se Veliki prasak zbio prije otprilike deset tisuća milijuna godina je taj da svemir mora sada biti dovoljno star kako bi neke zvijezde mogle završiti svoj razvoj i proizvesti elemente poput kisika ili ugljika, od kojih smo mi građeni, ali i dovoljno mlad da u njemu još ima zvijezda koje bi davale energiju za održanje života.

U okviru ne-granica uvjeta, može se primijeniti Feynmanovo pravilo pripisivanja brojeva svakoj povijesti svemira, da bi se ustanovilo za koja je svojstva svemira vjerojatno da će se pojaviti. U ovom kontekstu antropsko načelo nalaže da povijesti svemira sadrže inteligentan život. Osjećali bismo se ugodnije, glede antropskog načela, naravno, ako bismo mogli pokazati da se iz više različitih početnih konfiguracija mogao razviti svemir poput ovoga koji opažamo.To bi značilo da početno stanje dijela svemira u kome mi živimo nije moralo biti naročito pažljivo odabrano.

(L 3.10, lijevo)
Krajnje lijevo na ilustraciji prikazani su oni svemiri (A) koji su se urušili u sebe i postali zatvoreni. Na krajnjoj desnoj strani su oni otvoreni svemiri (B) koji će se nastaviti širiti zauvijek.

Oni kritični svemiri koji balansiraju između urušavanja i nastavljanja širenja poput (CI) ili dvostruke inflacije (C2), mogu pružiti sklonište inteligentnom životu. Naš svemir (D) se zasad nastavlja širiti.

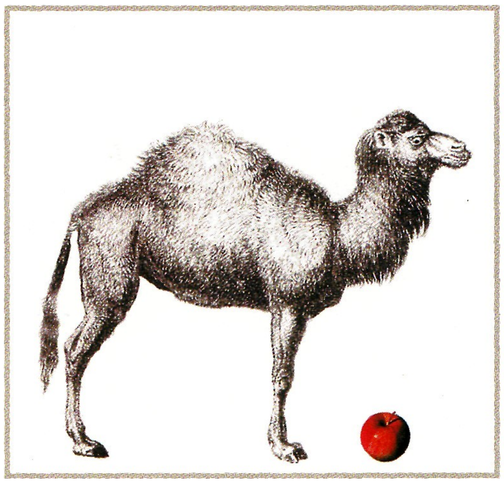


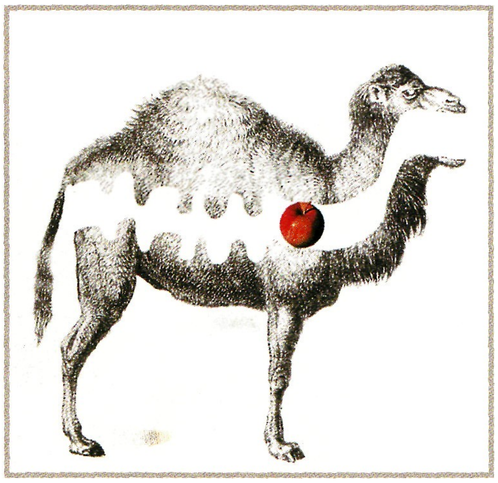
Dvostruka inflacija mogla bi pružiti sklonište inteligentnom životu.

Inflacija našeg svemira se zasad nastavlja.

se naziva antropsko načelo. Prema ovom načelu, svemir mora biti manje ili više ovakav kakvim ga vidimo, zato što, kada bi bio drukčiji, ne bi bilo nikoga tko bi ga mogao vidjeti (il. 3.10). Mnogim znanstvenicima se ne sviđa antropsko načelo, zato što izgleda prilično neodređeno i nije od velike koristi za predviđanje. Ali antropsko načelo može se precizno formulirati i, kako izgleda, ono je odlučujuće u razmatranju nastanka svemira. M-teorija, opisana u drugom poglavlju, dopušta vrlo veliki broj mogućih prikaza povijesti svemira. Većina ovih povijesti nije pogodna za razvoj inteligentnog života; ili su prazne, osim na prekratko vrijeme, ili su previše zakrivljene ili pak nepogodne na neki drugi način. No, prema zamisli Richarda Feynmana o mnogostrukim povijestima, ove nenastanjene povijesti mogu imati prilično veliku vjerojatnost (v. str. 84).

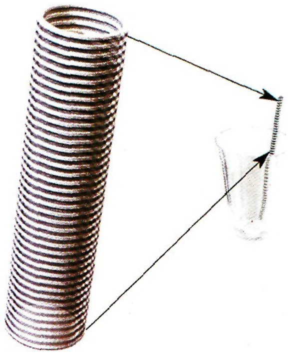
Zapravo nije uopće važno koliko može biti povijesti u kojima nema inteligentnih bića. Nas zanima jedino onaj podskup mnoštva povijesti u kojima se pojavljuje inteligentni život. Taj inteligentni život uopće ne mora biti sličan ljudskom. Mali zeleni izvanzemaljci također su misaoni, možda i misaoniji od nas. Ljudska se vrsta ne može baš podičiti inteligentnim ponašanjem.





Kao primjer učinkovitosti antropskog načela pogledajte broj prostornih dimenzija. Iz svakodnevnog iskustva znamo da živimo u trodimenzionom prostoru. Drugim riječima, položaj neke točke u prostoru možemo predstaviti sa trima brojevima: na primjer, geografskom dužinom, širinom i nadmorskom visinom. Ali zašto je prostor trodimenzion? Zašto nema dvije, četiri ili neki drugi broj dimenzija, kao u znanstvenoj fantastici? U M-teoriji, svemir ima devet ili deset dimenzija, ali smatra se da je šest ili sedam pravaca sklupčano u vrlo malim razmjerima, tako da preostaju tri dimenzije koje su velike i gotovo ravne (il. 3.11).

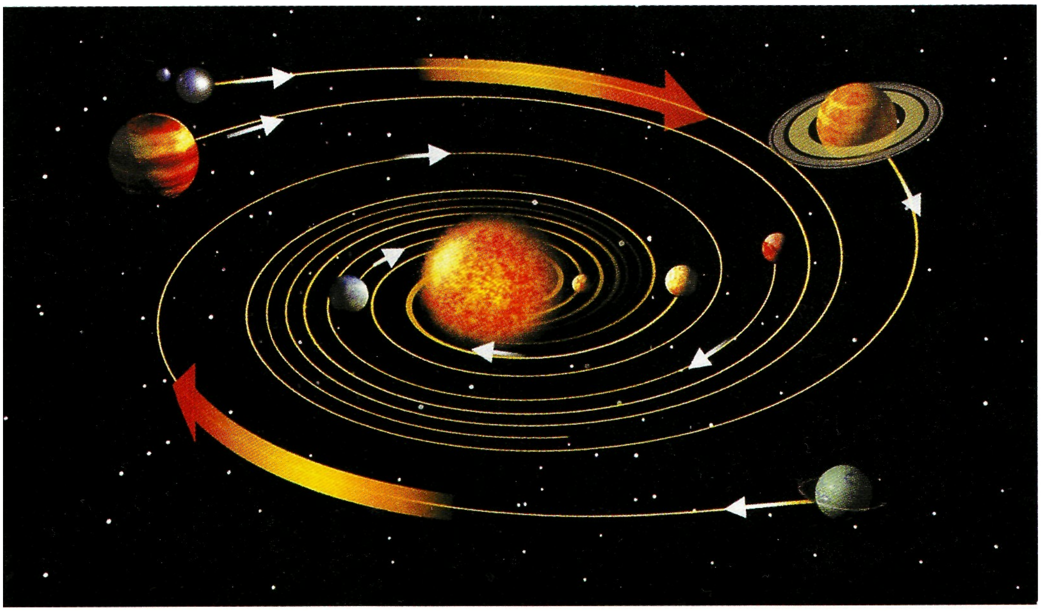
Zašto ne živimo u povijesti u kojoj je osam dimenzija sklupčano, pa bi preostale samo dvije koje bismo zapažali? Neka dvodimenziona životinja imala bi u tom svijetu silnih muka kako da probavi hranu. Ako bi se želudac pružao cijelom njenom dužinom, prolaz hrane bi je raspolovio i siroto stvorenje bi se raspalo. Dvije makroskopske ravne dimenzije nisu, dakle, dovoljne za nešto tako složeno kao što je inteligentni život. S druge strane, kod četiri ili više makroskopskih dimenzija, gravitacijska sila između dvaju tijela rasla bi znatno brže pri njihovom približavanju. Tada planeti ne bi imali postojane staze oko matičnih sunaca. Oni bi se ili srušili na zvijezde (il. 3.12A) ili odlutali u tamu i hladnoću (il. 3.12B).



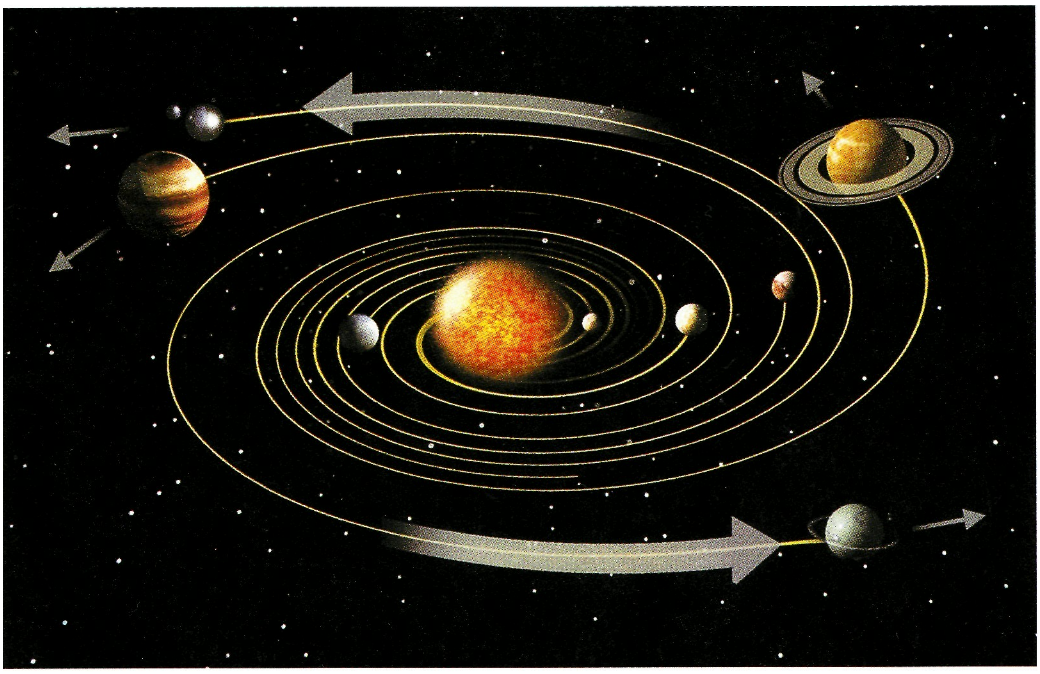
(L3.11)

Iz daljine, slamka u čaši izgleda kao jednodimenziona dužina.

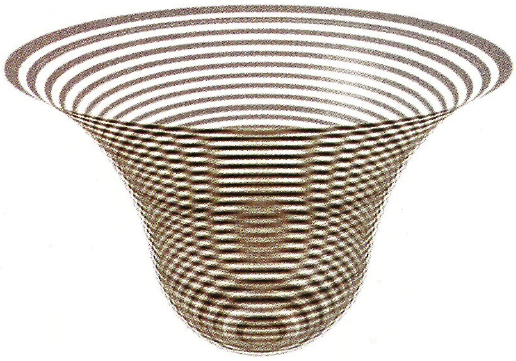
IL 3. I 2A



IL 3.1 2B



Prikaz povijesti u
imaginarnom vremenu



Prikaz povijesti u
stvarnom vremenu

(IL.3.13)
Najjednostavnija povijest u imaginarnom vremenu bez granica je lopta.
Ona određuje neku povijest u stvarnom vremenu, koja se širi na inflacijski način.

Slično tome, staze elektrona u atomima ne bi bile postojane, tako da poznata nam tvar uopće ne bi postojala. Prema tome, iako zamisao o višestrukim povijestima dopušta bilo koji broj makroskopskih dimenzija, jedino će povijesti s tri makroskopske dimenzije uključivati inteligentna bića. Samo će u takvim povijestima biti postavljano pitanje: "Zašto svemir ima tri dimenzije?"

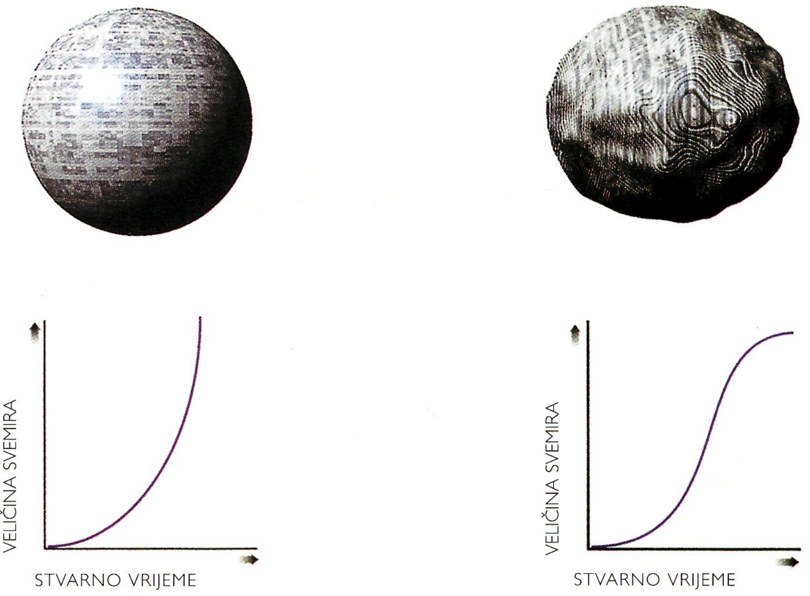
Najjednostavniji prikaz povijesti svemira u imaginarnom vremenu je lopta, poput površine Zemlje, ali s dvije dodatne dimenzije (il. 3.13). To je povijest svemira u stvarnom vremenu koju mi doživljavamo i u kojoj je svemir isti u svakoj točki prostora i širi se protokom vremena. Po tome je on poput svemira u kojem mi živimo. Ali širenje se zbiva vrlo brzo i ta brzina se povećava. Ovakvo ubrzano širenje naziva se inflacija, zato što nalikuje na sve brži rast cijena.

IL. 3.14

ENERGIJA MATERIJE ENERGIJA GRAVITACIJE

Za inflaciju u ekonomiji načelno se smatra da je loša stvar, ali kod svemira ona je vrlo blagotvorna. Veliki opseg širenja izravnava neravnine kojih je možda bilo u ranom svemiru. Kako se svemir širi, on posuđuje energiju od gravitacijskog polja da bi pravio novu materiju. Pozitivna energija materije ima točnu protutežu u negativnoj gravitacijskoj energiji, pa je ukupna energija ravna nuli. Kada se veličina svemira udvostruči, isto biva i s energijama materije i gravitacije — pa je tako dva puta nula i dalje nula. Kamo sreće da je svijet bankarstva tako jednostavan (il. 3.14).

Da je prikaz povijesti svemira u imaginarnom vremenu savršeno okrugla kugla, odgovarajuća povijest u stvarnom vremenu bila bi svemir koji se nastavlja širiti na inflacijski način zauvijek. Dok se



(L 3.15) INFLACIJSKI SVEMIR

U modelu vrućeg Velikog praska nije bilo dovoljno vremena u ranom svemiru da se toplina odlije s jednog područja na drugo. No, zapažamo da je, bez obzira na to u kojem pravcu gledali, temperatura mikrovalnog pozadinskog zračenja ista. To znači da je svemir u početnom stanju svuda imao potpuno istu temperaturu.

U nastojanju da se pronađe model u kome se iz mnogo različitih početnih stanja moglo razviti nešto slično sadašnjem svemiru, došlo se na zamisao da je rani svemir možda prošao kroz razdoblje vrlo brzog širenja. Za ovo širenje kaže se da je inflacijsko, u smislu da se odigrava sve većim ubrzanjem, a ne sve manjim, kakvog uočavamo danas. Ovakva inflacijska faza mogla bi pružiti odgovor na pitanje zašto svemir izgleda isti u svim pravcima; bilo bi, naime, u ranom svemiru dovoljno vremena da svjetlost stigne s jednog područja na drugo.

Odgovarajuća povijest u imaginarnom vremenu svemira, koji se nastavlja zauvijek širiti na inflacijski način savršena je kugla. Ali u našem svemiru inflacijsko širenje se usporilo poslije djelića sekunde i mogle su nastati galaktike. U imaginarnom vremenu, ovo znači da je prikaz povijesti svemira kugla s malo spljoštenim južnim polom.

INDEKS CIJENA NA VELIKO — INFLACIJA I HIPERINFLACIJA

Srpanj 1914.	1,0
Siječanj 1919.	2,6
Srpanj 1919.	3,4
Siječanj 1920.	12,6
Siječanj 1921.	14,4
Srpanj 1921.	14,3
Siječanj 1922.	**36,7**
Srpanj 1922.	**100,6**
Siječanj 1923.	**2,785**
Srpanj 1923.	**194.000**
Studeni 1923.	**726,000.000.000**

Jedna njemačka marka 1914.

Deset tisuća maraka 1923.

Dva milijuna maraka 1923.

Deset milijuna maraka 1923.

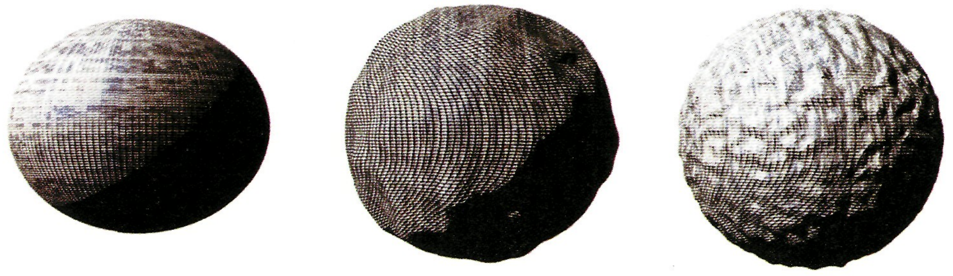
Jedna milijarda maraka 1923.

svemir inflacijski širi, materija se više ne može skupljati u galaktike i zvijezde pa stoga ne može nastati ni život, a ponajmanje inteligentan život. Shodno tome, iako zamisao o mnogostrukim povijestima dopušta mogućnost postojanja povijesti svemira u imaginarnom vremenu koje su savršeno okrugle lopte, one nisu posebno zanimljive. Mnogo su značajnija povijesti u imaginarnom vremenu koje su malo spljoštene na južnom polu kugle (il. 3.15).

U ovom slučaju, odgovarajuća povijest u stvarnom vremenu širit će se prvo na ubrzan, inflacijski način. Ali zatim će se širenje početi usporavati pa će moći započeti oblikovanje galaktika. Da bi mogao razviti inteligentan život, spljoštenost na južnom polu mora biti sasvim mala. To bi značilo da će se svemir u početku širiti izuzetno brzo. Rekordna brzina monetarne inflacije zabilježena je u Njemačkoj između dvaju svjetskih ratova, kada su cijene porasle milijardama puta — ali faktor inflacije koja se zbila u svemiru mora da je iznosio milijardu milijarda milijarda (il. 3.16).

(Il. 3.16)
NFLACIJA JE MOŽDA ZAKON PRIRODE

Pod djelovanjem inflacije cijene su u Njemačkoj od 1918. do veljače 1920. porasle pet puta. Od srpnja 1922. počela je faza hiperinflacije. Potpuno se izgubilo povjerenje u novac i indeks cijena rastao je sve brže i brže tijekom sljedećih petnaest mjeseci. Tiskare novca nisu mogle držati ritam s njegovim obezvrjeđivanjem. Krajem 1923. tri stotine tvornica papira radilo je punim kapacitetom, a na tiskanju novca bilo je angažirano danonoćno dvije tisuće tiskarskih strojeva u sto pedeset tiskara.



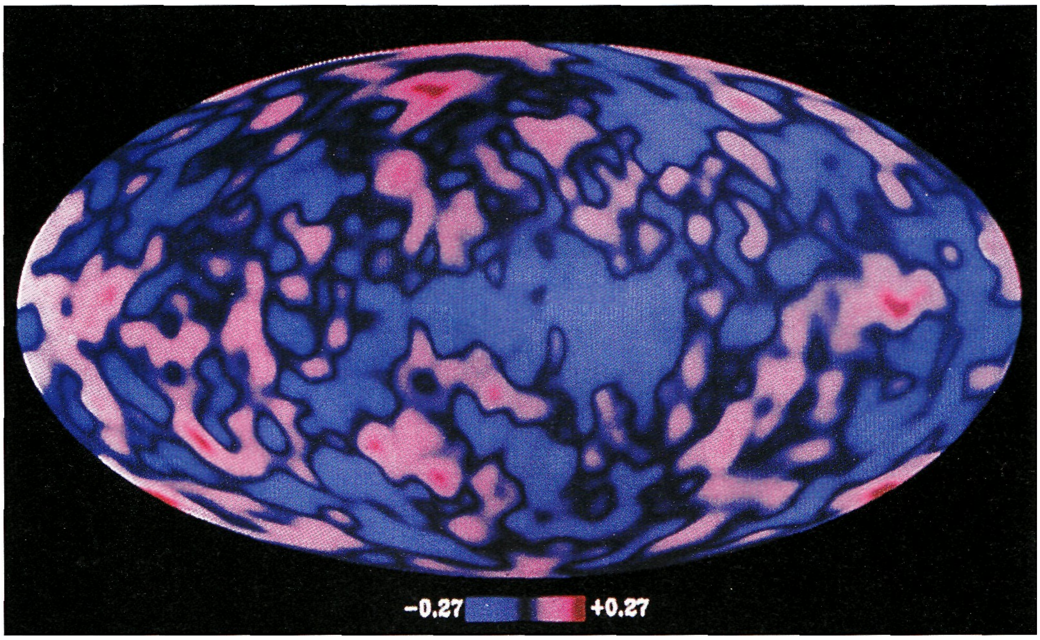
(IL.3.17)
VJEROJATNE I NEVJEROJATNE POVIJESTI

Najvjerojatnije su glatke povijesti poput (a), ali njih je samo malen broj.

Iako su nešto nepravilnije povijesti (b i c) manje vjerojatne, njih je toliko mnogo da ce se vjerojatne povijesti svemira odlikovati malim odstupanjem od savršeno glatke kugle.

Zbog načela neodređenosti, neće postojati samo jedna povijest svemira koji sadrži inteligentan život. Naprotiv, povijesti u imaginarnom vremenu bit će čitava porodica blago izobličenih kugli, od kojih svaka odgovara nekoj povijesti u stvarnom vremenu u kojoj se svemir inflacijski širi dugo, ali ne i vječno. Možemo se onda zapitati koje su od ovih dopustivih povijesti najvjerojatnije. Ustanovljujemo da najvjerojatnije povijesti nisu potpuno glatke već da imaju sićušne neravnine (il. 3.17). Ovi valići na najvjerojatnijim povijestima doista su sićušni. Odstupanje od glatkoće su reda veličine jedne stotisućinke. No, iako su ovako mali, uspjeli smo ih zabilježiti kao tanahne varijacije mikrovalnog pozadinskog zračenja, koje dolazi do nas iz različitih pravaca svemira. Satelit "Cosmic Background Explorer" (COBE), lansiran 1989., kartografirao je nebo u mikrovalnom području.

Različite boje ukazuju na različite temperature, ali čitav raspon od crvenog do plavog iznosi samo oko jednu desettisućinku stupnja.

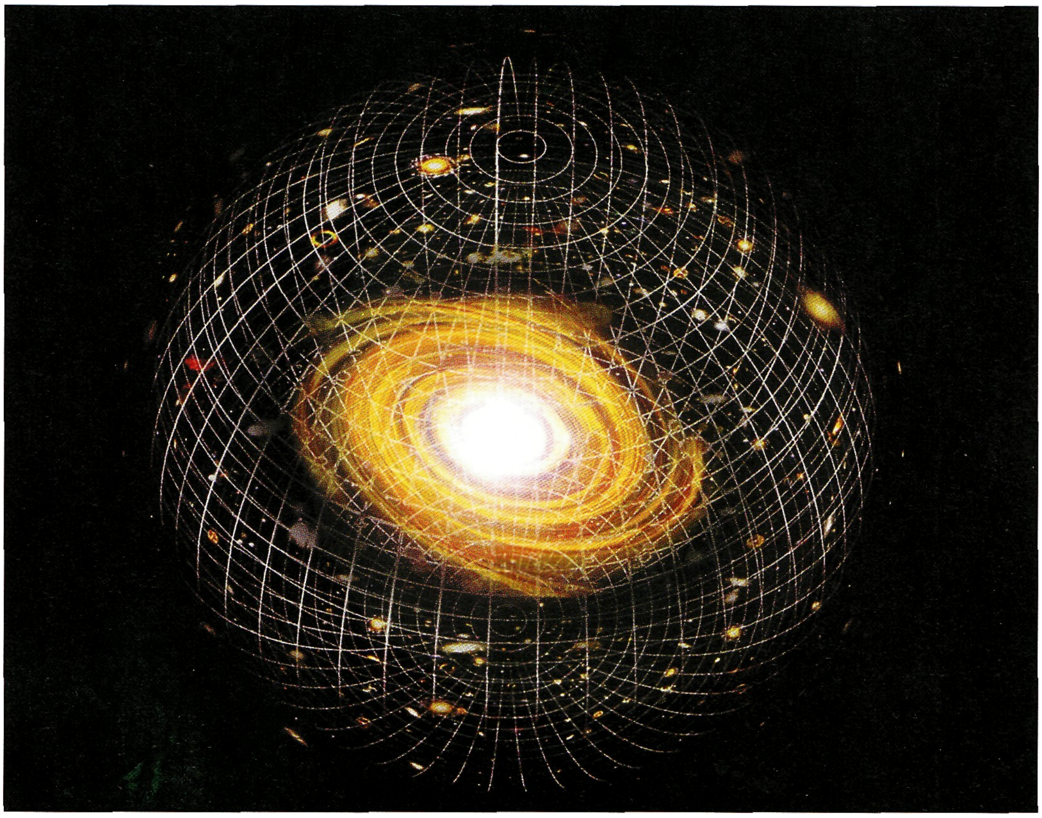


Karta cijelog neba dobivena pomoću uređaja DMR na satelitu COBE, a koja prikazuje sitne nabore u prostorvremenu.

No i ta je razlika u raznim područjima ranog svemira bila dovoljna da dodatno gravitacijsko privlačenje u gušćim područjima konačno obustavi njihovo širenje i dovede do skupljanja pod djelovanjem vlastite gravitacije, što je omogućilo nastanak galaktika i zvijezda. Tako je, barem u načelu, karta satelita COBE temeljni nacrt sveukupne grade svemira.

Koji budući tijek najvjerojatnijih povijesti svemira je u suglasju s pojavom inteligentnih bića? Kako izgleda, postoje različite mogućnosti, zavisno od količine tvari u svemiru. Ako ima više od određene kritične količine, gravitacijsko privlačenje između galaktika usporit će ih i konačno zaustaviti njihovo daljnje međusobno udaljavanje. One će se onda ponovno početi približavati jedna drugoj, da bi konačno završile u velikom stapanju, što će biti kraj povijesti svemira u stvarnom vremenu (v. il. 3.18 na str. 96).

Ako je gustoća svemira ispod kritične vrijednosti, onda je

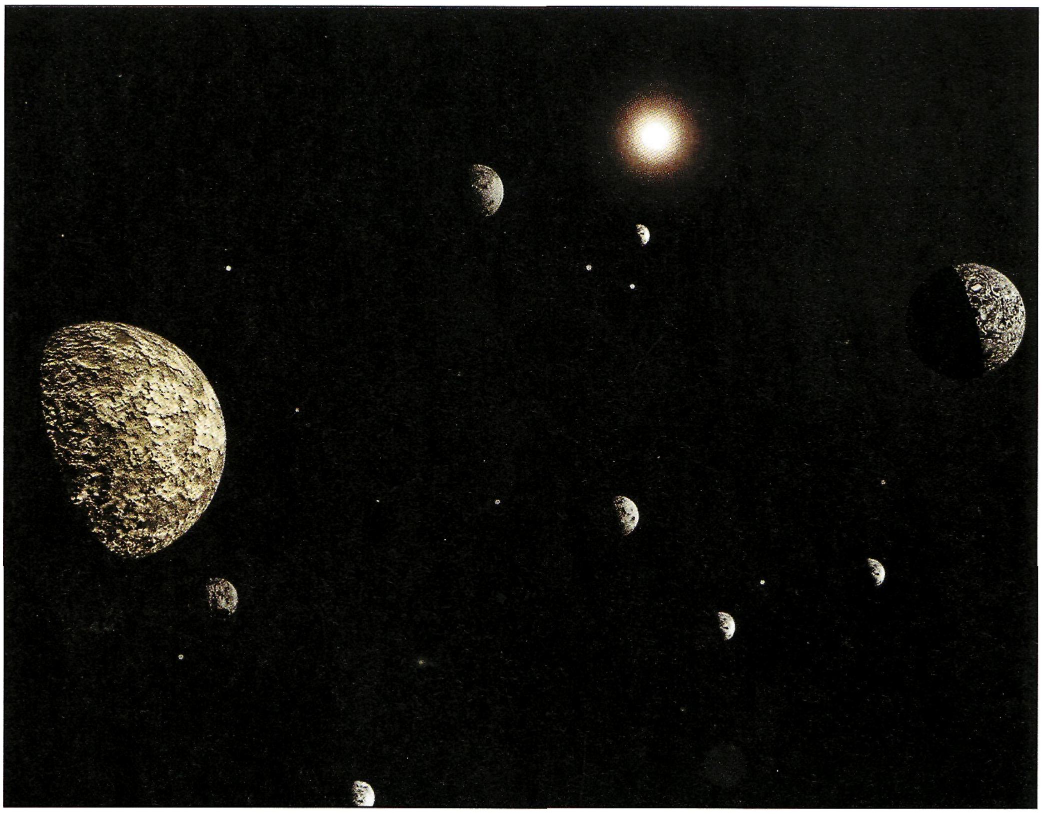


(Il. 3.18, iznad)
Jedan mogući kraj svemira je veliko sažimanje, kad će sva materija biti usisana natrag u golemi kataklizmički gravitacijski bunar ekstremne gustoće,

(IL. 3.19, nasuprot)
Dugo, studeno zamiranje tijekom kojeg sve prestaje, dok se posljednje zvijezde gase nakon što su istrošile svoje gorivo.

gravitacija preslaba da spriječi udaljavanje galaktika, što bi trajalo zauvijek. Sve će se zvijezde ugasiti, a svemir će postajati sve prazniji i hladniji. Kraj će, međutim, ovdje biti manje dramatičan. U oba ova scenarija svemir bi trajao još mnogo milijarda godina (il. 3.19).

Osim tvari, u svemiru se možda nalazi i ono što se naziva "vakuumska energija" — energija koja postoji čak i u prividno praznom prostoru. Prema Einsteinovoj slavnoj jednadžbi $E = mc^2$, ova vakuumska energija ima masu. To znači da je ona i izvor gravitacije te utječe na širenje svemira. Međutim, važno je uočiti da je djelovanje vakuumske energije suprotno djelovanju materije. Materija uzrokuje usporavanje širenja, a može ga konačno zaustaviti i preokrenuti. S druge strane, vakuumska energija izaziva ubrzavanje širenja, kao kod inflacije. Ustvari, vakuumska energija ponaša se baš kao i kozmološka konstanta, spomenuta u prvom poglavlju, a koju je Ein-

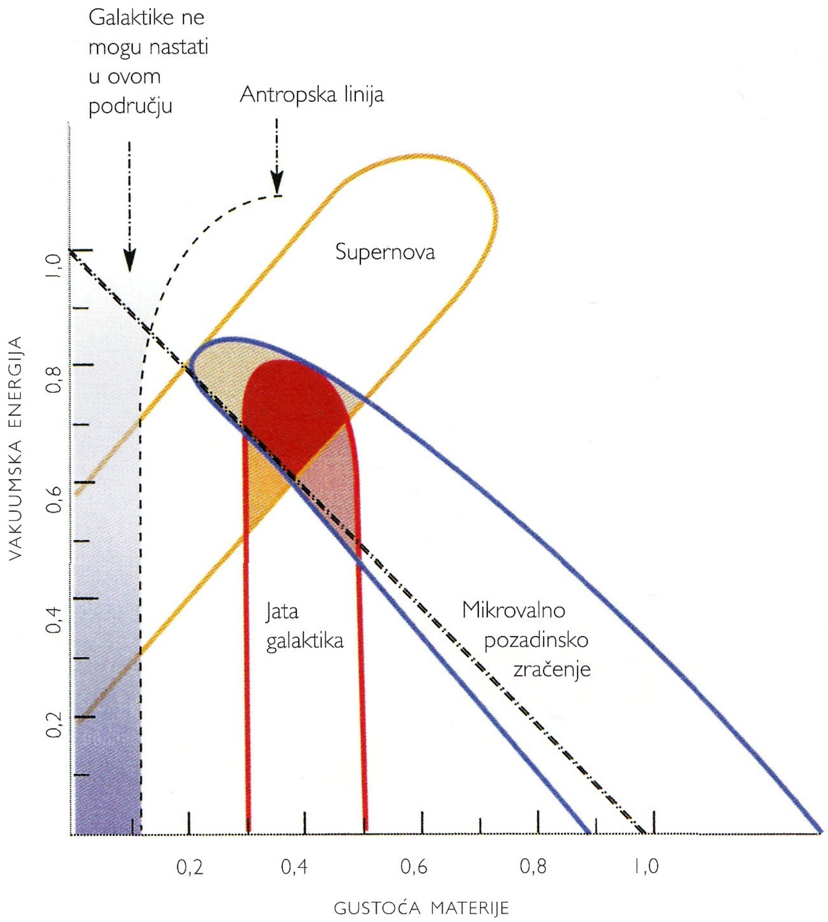


stein dodao svojim prvobitnim jednadžbama 1917. godine, kada mu je postalo jasno da one ne dopuštaju rješenje koje bi predstavljalo statični svemir. Nakon Hubbleovog otkrića širenja svemira, nestalo je povoda da se u jednadžbe uvede nova veličina i Einstein je odbacio kozmološku konstantu kao pogrešku.

Ali možda to ipak nije bila pogreška. Kao što je opisano u drugom poglavlju, sada nam je jasno da kvantna teorija podrazumijeva da je prostorvrijeme ispunjeno kvantnim fluktuacijama. U teoriji supersimetrije, beskonačne pozitivne i negativne energije ovih fluktuacija osnovnog stanja poništavaju se između čestica različitog spina. Međutim, kako se svemir ne nalazi u supersimetričnom stanju, ne bismo očekivali da se pozitivna i negativna energija ponište tako potpuno da ne preostane izvjesna mala, konačna količina vakuumske energije. Jedino iznenađenje je činjenica da je vakuumska

KOZMOLOŠKA KONSTANTA BILA JE MOJA NAJVEĆA POGREŠKA?

Albert Einstein



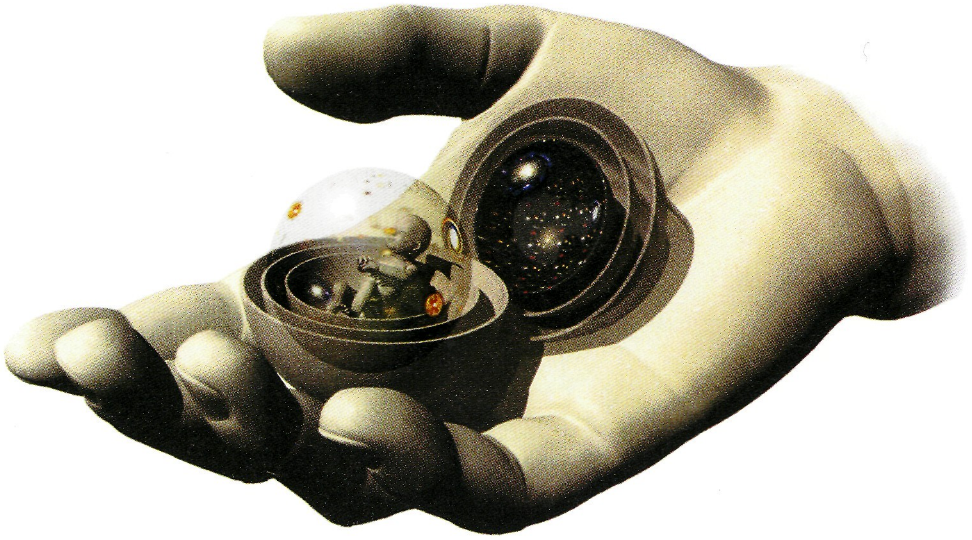
(IL 3.20)
Povezivanjem naiaza promatranja dalekih supernova, kozmičkog mikrovalnog pozadinskog zračenja i raspodjele materije u svemiru, mogu se prilično dobro procijeniti vakuumska energija i gustoća materije.

energija tako blizu nule da se sve donedavno za nju nije znalo. Možda je to još jedan primjer antropskog načela. Neka povijest s većom vakuumskom energijom ne bi proizvela galaktike pa tako u njoj ne bi ni bilo bića koja bi mogla postaviti pitanje: "Zašto vakuumska energija ima onu vrijednost koju ima?"

Možemo pokušati odrediti količinu tvari i vakuumske energije u svemiru iz različitih promatranja. Rezultati se mogu prikazati na dijagramu: gustoća tvari je na vodoravnoj osi, a vakuumska energija na okomitoj. Isprekidana crta prikazuje granicu područja u kojem se može razviti inteligentni život (il. 3.20).

"Mogao bih biti zatvoren u orahovu ljusku
i smatrati se kraljem beskrajnog prostranstva...

— Shakespeare,
Hamlet, 2. čin, 2. scena



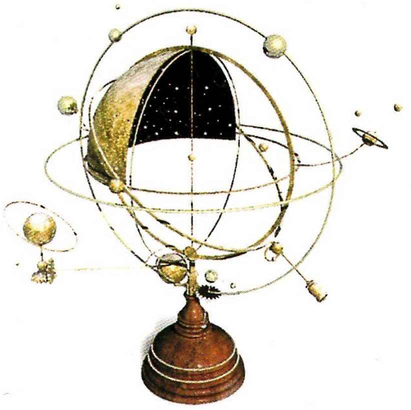
Promatranja supernova, jata galaktika i mikrovalnog pozadinskog zračenja, pokrivaju određena područja na ovom dijagramu. Srećom, sva tri područja imaju zajednički presjek. Ako gustoća materije i vakuumska energija leže u tom presjeku, to znači da se širenje svemira ponovno počelo ubrzavati, poslije dugog razdoblja usporavanja. Kako izgleda, inflacija bi mogla biti prirodni zakon.

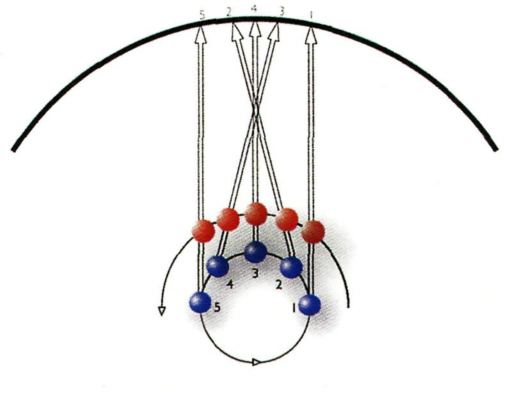
U ovom smo poglavlju vidjeli kako se ponašanje silno velikog svemira može razumjeti kroz njegovu povijest u imaginarnom vremenu, a koja je tek majušna spljoštena kugla. Ona je poput Hamletove orahove ljuske, ali taj orah bilježi sve što se događa u stvarnom vremenu. Hamlet je bio u pravu: možemo biti zatvoreni u orahovu ljusku, ali i dalje se smatrati kraljevima beskrajnog prostranstva.

POGLAVLJE 4

PREDVIĐANJE BUDUĆNOSTI

Kako gubitak informacije u crnim jamama može umanjiti našu sposobnost predviđanja budućnosti.



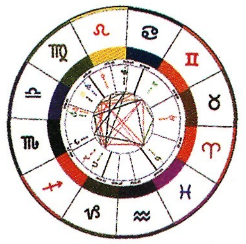


(IL.4.I)
Promatrač na Zemlji (plavo) kruži oko Sunca te promatra Mars (crveno) na pozadini zvjezdanog neba.

Složeno prividno kretanje planeta nebom može se objasniti Newtonovim zakonima i nema nikakvog utjecaja na živote pojedinaca.

Čovječanstvo je oduvijek corilo od želje da nadzire budućnost ili da je barem pretkazuje. U tome leži i razlog velike popularnosti astrologije. Astrologija tvrdi da su zbivanja na Zemlji povezana s gibanjima planeta preko neba. Ovo je znanstveno jednostavno provjerljiva hipoteza, ili bi to bila kada bi astrolozi izašli na čistinu s nedvosmislenim predviđanjima koja se mogu provjeriti. No, oni postupaju lukavo; njihova predviđanja tako su neodređena da mogu podrazumijevati svaki ishod. Izjave poput "osobni odnosi postat će napeti" ili "ukazat će vam se financijski povoljna prilika" nikada ne mogu ispasti pogrešne.

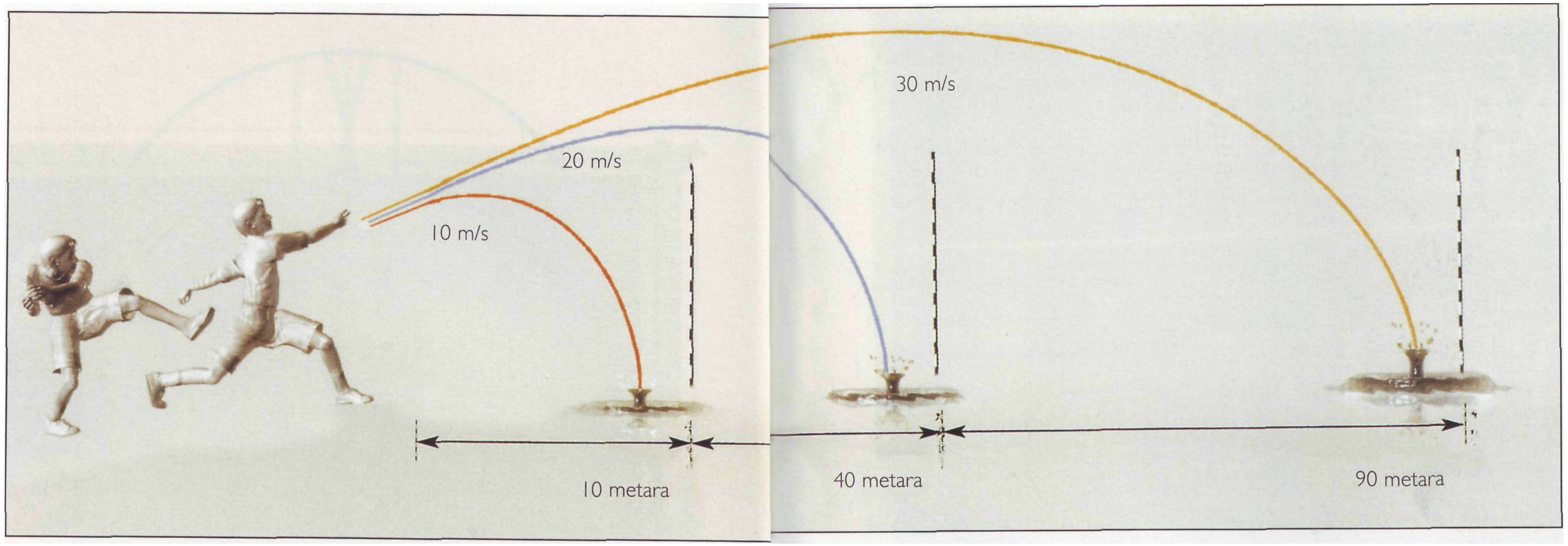
Ali pravi razlog zbog kojeg većina znanstvenika ne vjeruje u astrologiju nije nedostatak znanstvenog dokaza, već to što ona nije u suglasju s drugim teorijama koje su provjerene. Kada su Kopernik i Galileo otkrili da planeti kruže oko Sunca, a ne oko Zemlje, i kada je Newton otkrio zakone koji upravljaju njihovim gibanjem, astrologija je postala krajnje nevjerodostojna. Zašto bi položaji drugih planeta na nebu viđenog sa Zemlje imali bilo kakvu vezu sa sudbom skupine makromolekula na jednom sićušnom planetu, koje sebe nazivaju inteligentnima (il. 4.1)? A astrologija želi da upravo u to povjerujemo. Neke od teorija opisanih u ovoj knjizi nemaju ništa veću eksperimentalnu podršku nego što je ima astrologija, ali mi ipak vjerujemo u njih zato što su one u suglasju s teorijama koje su prošle provjeru.



"Mars se ovcu) mjeseca nalazi u Strijelcu i Za vas će to biti vrijeme da upoznate sebe. Mars vam nalaže da vodite život prema vlastitom osjećaju Za ispravno, bez obzira na to što drugi smatraju ispravnim. A tako će i biti.

Dvadesetog Saturn stiže u područje vaše solarne karte koje se odnosi na obveze i karijeru, naučit ćete preuzimati odgovornost i hvatati se ukoštac s teškim međuljudskim odnosima.

Međutim, u vrijeme punog Mjeseca doživjet ćete čudesni uvid u vlastiti život, što će vas preobratiti."



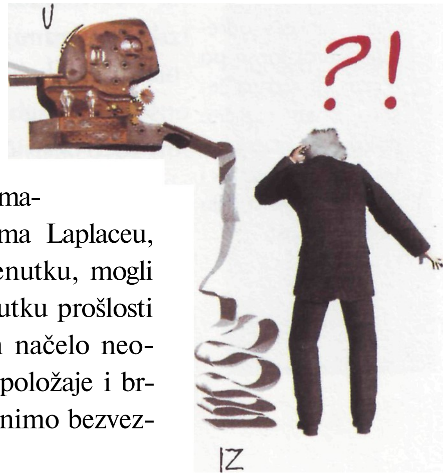
(Il 4.2)
Ako znate smjer i brzinu bačene lopte, možete predvidjeti gdje će pasti.

(IL. 4.3)

Uspješnost Newtonovih zakona i drugih fizikalnih teorija dovela je do zamisli o znanstvenom determinizmu, što je prvi izložio markiz de Laplace početkom devetnaestog stoljeća. Laplace je smatrao da kada bismo u istom trenutku znali položaje i brzine svih čestica u svemiru, zakoni fizike omogućili bi nam da predvidimo stanje svemira u svakom trenutku prošlosti ili budućnosti (il. 4.2).

Drugim riječima, ako znanstveni determinizam vrijedi, trebali bismo, barem načelno, moći predviđati budućnost, pa nam tako ne bi bila potrebna astrologija. Dakako, u praksi se čak i nešto tako jednostavno kao što je Newtonova teorija gravitacije temelji na jednadžbama koje ne možemo točno riješiti za više od dvije čestice. Štoviše, u jednadžbama se često javlja svojstvo poznato kao kaos, tako da mala promjena položaja ili brzine može dovesti do potpuno različitog ponašanja u kasnijim vremenima. Kao što to dobro znaju oni koji su vidjeli film *Jurski park,* sitni poremećaj na jednom mjestu može na kraju dovesti do ogromne promjene na drugom. Zamah leptirovih krila u Tokiju može izazvati pljusak u New Yorku (il. 4.3). Nezgoda je u tome što se ovaj niz događaja ne može ponoviti. Kad sljedeći put taj isti leptir bude zamahnuo krilima, mnoštvo drugih čimbenika bit će različito i također će utjecati na klimatske prilike. To je razlog nepouzdanosti vremenskih prognoza na dulje razdoblje.

Iako bi nam, iz istog razloga, zakoni kvantne elektrodinamike trebali načelno omogućiti da izračunamo sve u kemiji i biologiji, nismo ipak imali mnogo uspjeha u predviđanju ljudskog ponašanja iz matematičkih jednadžbi. No, usprkos ovim praktičnim poteškoćama, većina znanstvenika utješila se pomišlju da je, barem u načelu, budućnost predvidiva.



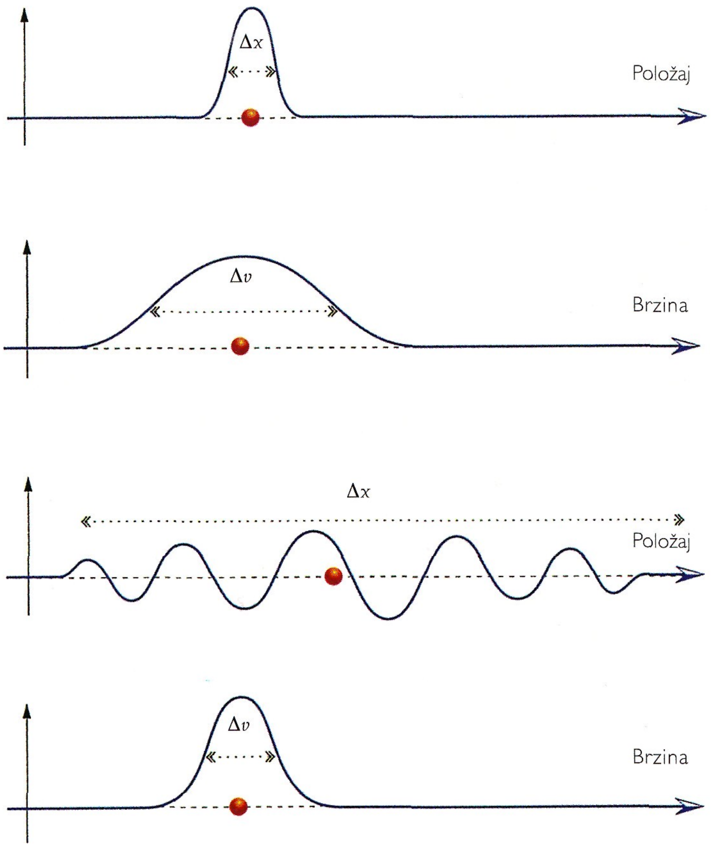
Na prvi pogled, izgleda da determinizmu također prijeti načelo neodređenosti, koje kaže da ne možemo točno izmjeriti i položaj i brzinu neke čestice u istom trenutku. Sto točnije mjerimo položaj, to manje točno možemo odrediti brzinu, i obrnuto. Prema Laplaceu, kada bismo znali položaje i brzine čestica u nekom trenutku, mogli bismo im odrediti položaje i brzine u bilo kojem trenutku prošlosti ili budućnosti. Ali kako uopće da počnemo ako nam načelo neodređenosti ne dopušta da istodobno točno znamo i položaje i brzine? Kako god bilo jako naše računalo, ako ga nahranimo bezveznim podacima, dobit ćemo bezvezne izračune.

VALNA FUNKCIJA ψ S IZRAŽENIM MAKSIMUMOM

RASPODJELA VJEROJATNOSTI ZA BRZINU ČESTICE

VALNI NIZVALNE FUNKCIJE ψ

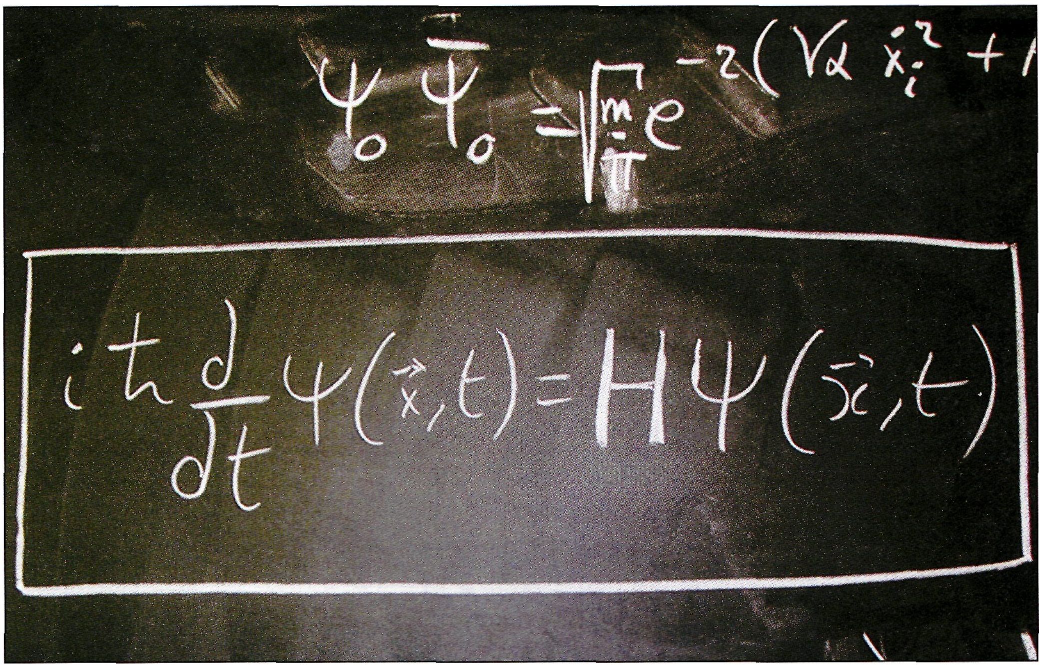
RASPODJELA VJEROJATNOSTI ZA BRZINU ČESTICE



(IL. 4.4)
Valna funkcija određuje vjerojatnosti po kojima će zadana čestica imati različite položaje i brzine na takav način da se *Ax* i *Av* pokoravaju načelu neodređenosti.

Međutim, determinizam *je bio* obnovljen u promijenjenom obliku u jednoj novoj teoriji koja se naziva kvantnom mehanikom i koja obuhvaća načelo neodređenosti. U kvantnoj mehanici može se, grubo govoreći, predvidjeti polovina onoga što obećava predvidjeti klasični Laplaceov determinizam. U kvantnoj mehanici, čestica nema točno određen položaj i brzinu, ali se njeno stanje ipak *može* predstaviti onim što se zove valna funkcija (il. 4.4).

Valna funkcija neke čestice dodjeljuje svakoj točki prostora jedan broj koji iskazuje vjerojatnost da će se ta čestica naći na tome mjestu. Način na koji se valna funkcija mijenja iz točke u točku govori o tome koliko su vjerojatne njene različite brzine. Neke valne funkcije imaju oštre vrhove u nekim posebnim točkama prostora. U tim slučajevima imamo samo malu neodređenost glede položaja

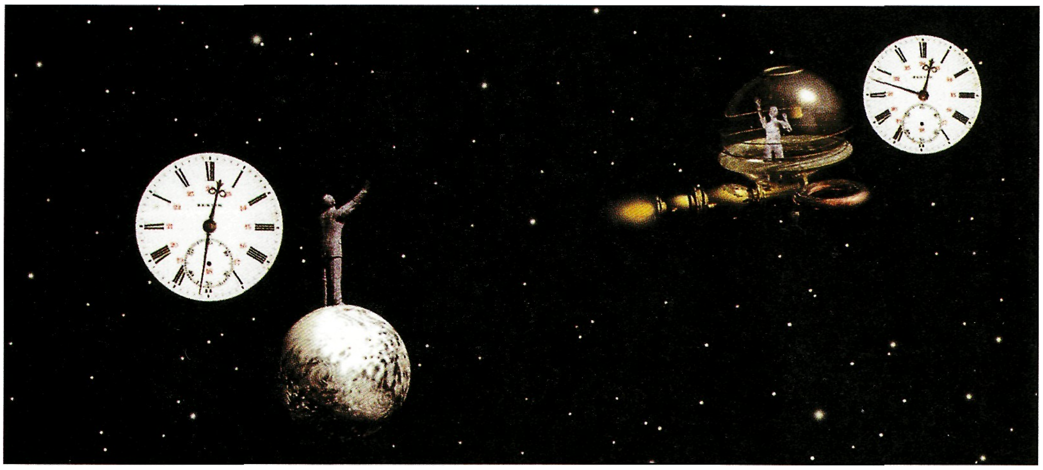


(IL. 4.5)
SCHRÖDINGEROVA JEDNADŽBA

Razvoj u vremenu valne funkcije ψ određen je Hamiltonovim operatorom H koji stoji u vezi s energijom razmatranog fizičkog sustava.

čestice. Ali također možemo vidjeti na dijagramu da se u tim slučajevima valna funkcija brzo mijenja blizu te točke, pružajući se prvo nagore s jedne strane, a onda nadolje s druge. To znači da je distribucija vjerojatnosti za brzinu raspršena u širokom opsegu. Drugim riječima, neodređenost brzine je velika. Razmotrimo sad kao suprotnost tome jedan neprekidni periodični val. Tu je sad na snazi velika neodređenost glede položaja, ali mala neodređenost u odnosu na brzinu. Opis čestice valnom funkcijom daje, dakle, ili točno određen položaj ili brzinu. Time se poštuje načelo neodređenosti. Postaje jasno da je valna funkcija *sve* što se može točno odrediti. Ne može se pretpostaviti čak ni to da čestica ima položaj i brzinu koji su poznati Bogu, a skriveni nama. Ove teorije "skrivene varijable" daju nalaze koji nisu u suglasju s promatranjima. Čak i Boga sputava načelo neodređenosti: ni on ne može znati i položaj i brzinu. Jedino što može znati je valna funkcija.

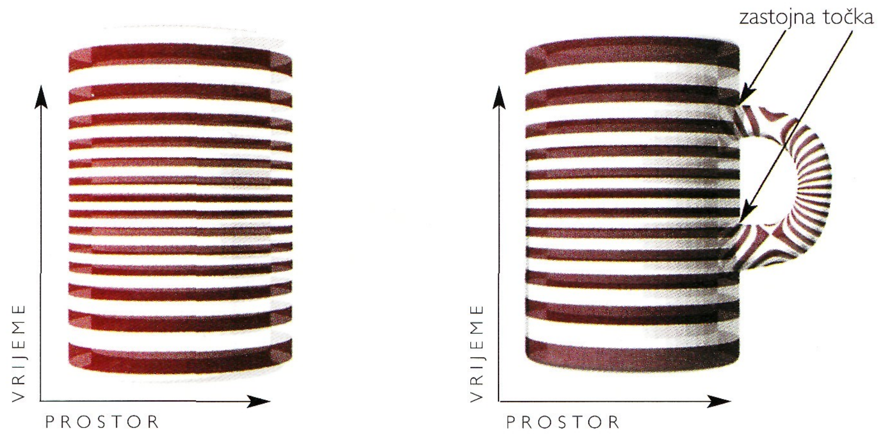
Brzina promjene valne funkcije tijekom vremena dana je Schrodingerovom jednadžbom (il. 4.5). Ako znamo valnu funkciju



(IL. 4.6)
U ravnom prostor-vremenu specijalne teorije relativnosti promatrači koji se gibaju različitim brzinama drukčije ce izmjeriti vrijeme, ali možemo primijeniti Schrodingerovu jednadžbu u svakom od tih vremena da bismo predvidjeli kakva će valna funkcija biti u budućnosti.

u jednom trenutku, pomoću Schrodingerove jednadžbe možemo je izračunati za bilo koji trenutak prošlosti ili budućnosti. Prema tome, determinizam ipak postoji u kvantnoj teoriji, ali samo u ograničenom opsegu. Umjesto da smo u stanju predviđati i položaje i brzine, možemo predviđati samo valnu funkciju. A ona nam omogućuje da točno predvidimo ili položaje ili brzine, ali ne i obje te veličine. U kvantnoj teoriji, dakle, sposobnost davanja točnih predviđanja iznosi samo polovinu vrijednosti koju je imala u klasičnom Laplaceovom pogledu na svijet. No, u ovom ograničenom smislu i dalje je moguće govoriti o determinizmu.

Međutim, primjena Schrodingerove jednadžbe na razvoj valne funkcije unaprijed kroz vrijeme (dakle predviđanje što će se u budućnosti dogoditi) implicitno pretpostavlja da vrijeme ravnomjerno teče svuda i zauvijek. To je svakako bilo točno u Newtonovoj fizici. Za vrijeme se smatralo da je apsolutno, što znači da je svaki događaj u svemiru bio označen nekim brojem koji se nazivao vrijeme, kao i da je niz vremenskih oznaka tekao glatko iz beskonačne prošlosti u beskonačnu budućnost. Ovo bi se moglo nazvati zdravorazumsko viđenje vremena. Mnogi ljudi, pa čak i mnogi fizičari, imaju ga negdje u zaleđu uma. No, 1905. godine, kao što smo vidjeli, predodžbu o apsolutnom vremenu ukida specijalna teorija relativnosti, u kojoj vrijeme više nije nezavisno, samostojeće svojstvo već samo sastavni dio četverodimenzionog kontinuuma, nazvanog prostorvrijeme. U specijalnoj teoriji relativnosti, različiti promatrači koji putuju različitim brzinama kreću



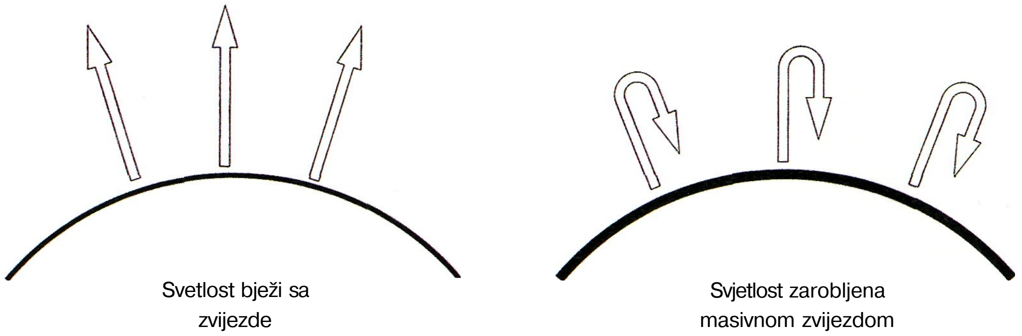
se kroz prostorvrijeme različitim stazama. Svaki promatrač ima, duž puta kojim se giba, vlastitu mjeru vremena, a različiti promatrači mjerit će različite intervale vremena između događaja (il. 4.6).

U specijalnoj teoriji relativnosti, dakle, ne postoji jedinstveno apsolutno vrijeme kojima bismo mogli označiti događaje. No, prostorvrijeme je u specijalnoj teoriji relativnosti ravno. To znači da u njoj vrijeme, koje mjeri svaki promatrač, ravnomjerno raste u prostorvremenu iz minus beskonačnosti u beskonačnoj prošlosti u plus beskonačnost u beskonačnoj budućnosti. Možemo koristiti bilo koje od ovih mjerenja vremena za Schrodingerovu jednadžbu i razviti valnu funkciju. U specijalnoj teoriji relativnosti, znači, imamo još uvijek kvantnu verziju determinizma.

Situacija je postala drukčijom u općoj teoriji relativnosti, u kojoj prostorvrijeme nije ravno već zakrivljeno, izobličeno pod utjecajem mase i energije u njemu. U našem Sunčevom sustavu zakrivljenost prostorvremena sasvim je mala, barem u makroskopskim razmjerima, tako da to ne utječe na našu uobičajenu predodžbu o vremenu. Pod takvim okolnostima, primjena ovog vremena u Schrodingerovoj jednadžbi i dalje će dati deterministički razvoj valne funkcije. No, čim uvedemo znatno zakrivljeno prostorvrijeme, otvara se mogućnost prostorvremena u kojima vrijeme ne bilježi više za svakoga promatrača stalni rast, kako bismo to očekivali kod zdravorazumskog mjerenja vremena. Zamislimo, na primjer, prostorvrijeme kao uspravni valjak (il. 4.7).

(IL 4.7) VRIJEME SE ZAUSTAVLJA

Pri mjerenju vremena nužno će se pojaviti zastojne točke ondje gdje se drška spaja s glavnim valjkom: točke gdje vrijeme stoji. U tim točkama vrijeme ne bi išlo ni u jednom smjeru. Tu se, dakle, ne bi mogla primijeniti Schrodingerova jednadžba za predviđanje budućeg izgleda valne funkcije.



IL 4,9

Visina valjka označavala bi mjeru vremena koje raste za svakog promatrača i ide iz minus beskonačnosti prema plus beskonačnosti. Međutim, pretpostavimo sad da je prostorvrijeme poput valjka s drškom (jednom vrstom "crvotočine") koja se na jednom mjestu odvaja od valjka, da bi se kasnije ponovno spojila. U tom slučaju, svaka mjera vremena imala bi nužno «zastojne točke» ondje gdje se drška spaja s tijelom valjka: točke u kojima je vrijeme zastalo. U tim točkama vrijeme ne bi raslo ni za jednog promatrača. U ovakvom prostorvremenu ne bismo mogli primijeniti Schrodingerovu jednadžbu da dobijemo deterministički razvoj valne funkcije. Pripazite na crvotočine: nikada ne znate što iz njih može izaći.

IL. 4.8

Crne jame su razlog zbog koga smatramo da vrijeme ne raste za svakog promatrača. Prva rasprava o crnim jamama potječe iz 1783. Tadašnji predavač na Cambridgeu, John Michell, izložio je sljedeći slijed razmišljanja: ako se neki predmet, kao što je topovska kugla, ispali okomito uvis, njen uspon usporavat će gravitacija, sve dok ona nakon nekog vremena ne prestane dobivati na visini te počne padati natrag (il. 4.8). Ako je početna brzina veća od neke kritične vrijednosti koja se naziva brzina bijega, gravitacija neće biti dovoljno snažna da zaustavi kuglu i ona će otići sa Zemlje. Brzina bijega s površine Zemlje je oko 12 kilometara u sekundi, a s površine Sunca 618 kilometara u sekundi.

SCHWARZSCHILDOVA CRNA JAMA

Njemački astronom Karl Schwarzschild našao je 1916. jedno rješenje za jednadžbe Einsteinove opće teorije relativnosti koje predstavlja kuglasta crnu jamu. Iz Schwarzschildovog rada proizašla je jedna izuzetna posljedica opće relativnosti. On je pokazao da ako je masa neke zvijezde stiješnjena u dovoljno mali prostor; gravitacijsko polje na njenoj površini postaje toliko jako da mu ni svjetlost ne može umaći. To je ono što danas nazivamo crna jama, područje prostorvremena omeđeno takozvanim događajnim obzorom, odakle ništa, pa ni svjetlost, ne može stići do vanjskog promatrača.

Fizičari, uključujući i Einsteina, dugo su bili skeptični glede toga mogu li se tako krajnja stanja materije pojaviti u stvarnom svemiru. Sada nam je, međutim, jasno da kad bilo koja dovoljno teška nerotirajuća zvijezda, ma koliko složenog oblika i unutrašnjeg sklopa, ostane bez nuklearnog goriva, ona neumitno kolabira do savršeno kuglaste Schwarzschildove crne jame. Polumjer (R) događajnog obzora crne jame zavisi jedino od njene mase i zadan je formulom:

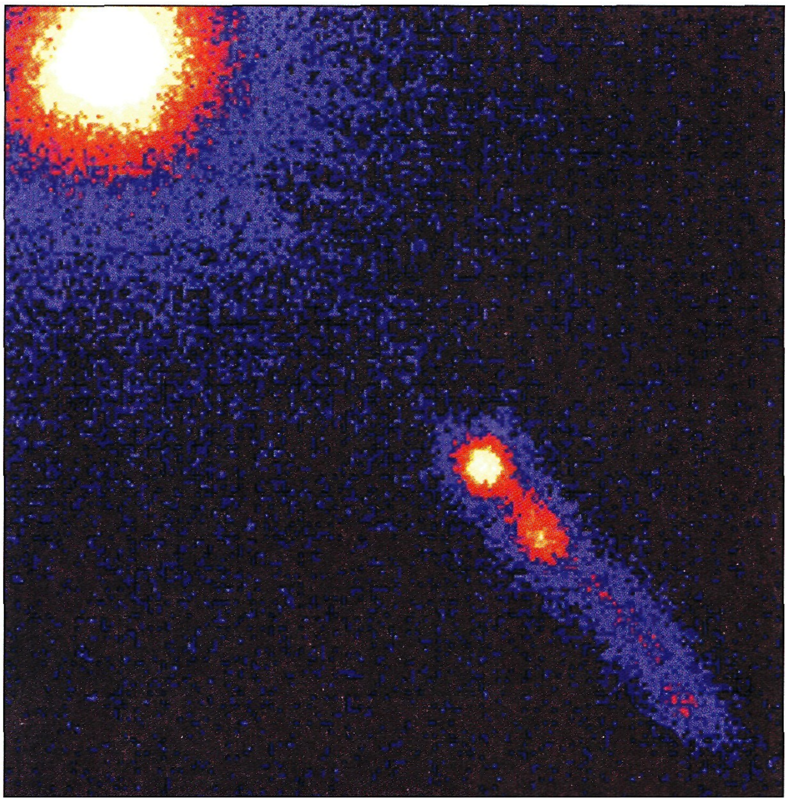
$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

U njoj (c) označava brzinu svjetlosti, (G) Newtonovu konstantu, a (M) masu crne jame. Crna jama iste mase kao i naše Sunce, na primjer; imala bi polumjer samo oko tri kilometra!

Obje spomenute brzine znatno su veće od brzine topovske kugle, ali su male u usporedbi s brzinom svjetlosti (300.000 kilometara u sekundi). Prema tome, svjetlost može lako napustiti Zemlju ili Sunce. No, Michell je ustvrdio da možda postoje zvijezde koje su znatno masivnije od Sunca, tako da je brzina bijega s njihove površine veća od brzine svjetlosti (il. 4.9). Te zvijezde ne bismo mogli vidjeti zato što bi njihova gravitacija vraćala natrag svjetlost koju zrače. Michell je takva nebeska tijela nazvao tamne zvijezde, a mi ih danas nazivamo crne jame.

Michellova zamisao o tamnim zvijezdama zasnivala se na Newtonovoj fizici u okviru koje je vrijeme apsolutno i traje bez obzira na događanja. One, dakle, nisu utjecale na našu sposobnost da predviđamo budućnost u klasičnoj Newtonovoj slici. Ali okolnosti su se pokazale potpuno drukčije u općoj teoriji relativnosti, u kojoj masivna tijela zakrivljuju prostorvrijeme.

Godine 1916., nedugo nakon što je ova teorija izvorno izložena, Karl Schwarzschild (koji je ubrzo zatim umro nakon što je obolio na ruskom ratištu) našao je rješenje jednadžbi polja opće teorije relativnosti koje predstavlja crnu jamu. Schwarzschildov rad i njegova va-



(IL.4.10)
Kvazar 3C273, prvi otkriveni kvazizvjezdani radioizvor, stvara ogromne količine energije na malom području. Kako izgleda, upadanje materije u crnu jamu jedini je mehanizam kojim se može objasniti takva sjajnost.

JOHN WHEELER

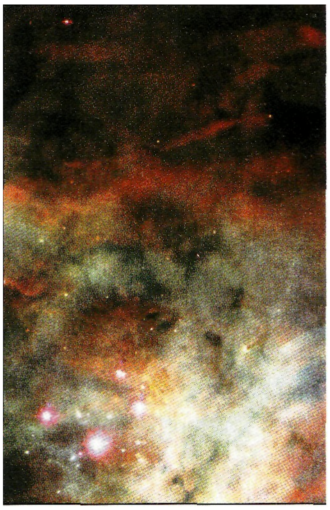
John Archibald Wheeler rodio se 1911. u Jacksonvilleu, na Floridi. Doktorirao je 1933. na Sveučilištu Johns Hopkins, obranivši rad o raspršenju svjetlosti na atomima helija. S danskim fizičarem Nielsom Bohrom postavio je 1938. teoriju nuklearne fisije. Nedugo zatim Wheeler se, zajedno sa svojim studentom Richardom Feynmanom posvetio proučavanju elektromagnetizma; ali ubrzo nakon ulaska Amerike u drugi svjetski rat, obojica su se priključili "Projektu Manhattan".

Početkom pedesetih godina, nadahnut radom Roberta Oppenheimera iz 1939. o gravitacijskom kolapsu masivnih zvijezda, Wheeler je usmjerio pažnju na Einsteinovu opću teoriju relativnosti. U to je vrijeme većina fizičara bila zaokupljena proučavanjem nuklearne fizike, dok opća teorija relativnosti nije smatrana bitnom za fizički svijet. Ali gotovo samostalno, Wheeler je preorao ovo polje, kako svojim istraživačkim radom tako i predavanjima u okviru prvog tečaja o relativnosti na Princetonu.

Znatno kasnije, 1969, on je skovao termin crna jama, označivši njime kolabirano stanje materije za koje su i dalje samo rijetki vjerovali da je stvarno. Nadahnut radom Wernera Israela, postavio je pretpostavku da su crne jame "bez kose", odnosno da se kolabirano stanje bilo koje nerotirajuće masivne zvijezde može, zapravo, opisati Schwarzschildovim rješenjem.

žnost ostali su još mnogo godina nezamijećeni. Sam Einstein nikada nije povjerovao u crne jame, a njegovo mišljenje dijelila je većina pripadnika stare garde opće teorije relativnosti. Sjećam se jednog putovanja u Pariz gdje sam trebao održati predavanje o mom otkriću da iz kvantne teorije proizlazi da crne jame nisu potpuno crne. Predavanje je ispalo prilično neuspješno zato što u to vrijeme gotovo nitko u Parizu nije vjerovao u crne jame. Francuzi su čak smatrali da naziv *(trou noir* — što se može prevesti i kao *crna rupa,* op. prev.) ima nepristojne seksualne aluzije, te ga treba zamijeniti terminom *astre occlu,* "skrivena zvijezda". No, ni ovaj, kao ni bilo koji drugi predloženi termin nije u toj mjeri raspalio maštu javnosti kao termin crna jama *(black hole)* koji potječe od Johna Archibalda Wheelera, američkog fizičara koji je nadahnuo mnoga suvremena dostignuća na ovom polju.

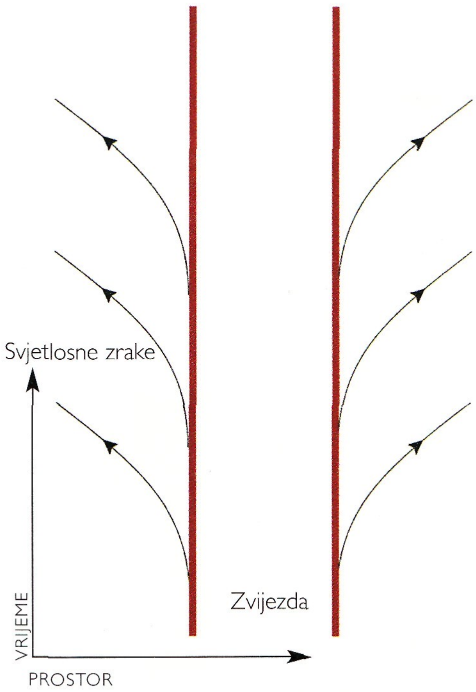
Otkriće kvazara 1963. godine donijelo je plimu teorijskih radova o crnim jamama, kao i promatračkih nastojanja da se one otkriju (il. 4.10). Evo do kakve se slike na osnovu toga došlo. Uzmimo za primjer život neke zvijezde čija je masa dvadeset puta veća od Sunčeve. Takve zvijezde nastaju iz plinovitih oblaka sličnih onome u Orionovoj maglici (il. 4.11). Kako se plinoviti oblaci skupljaju pod djelovanjem vlastite gravitacije, plin se zagrijava i konačno postaje dovoljno topao da započnu reakcije nuklearne fuzije, pretvaranje vodika u helij. Toplina nastala pritom stvara tlak koji postaje protuteža gravitaciji zvijezde i sprječava njeno daljnje skupljanje. Zvijezda ostaje u tom stanju vrlo dugo, trošeći vodik i zračeći energiju u svemir.



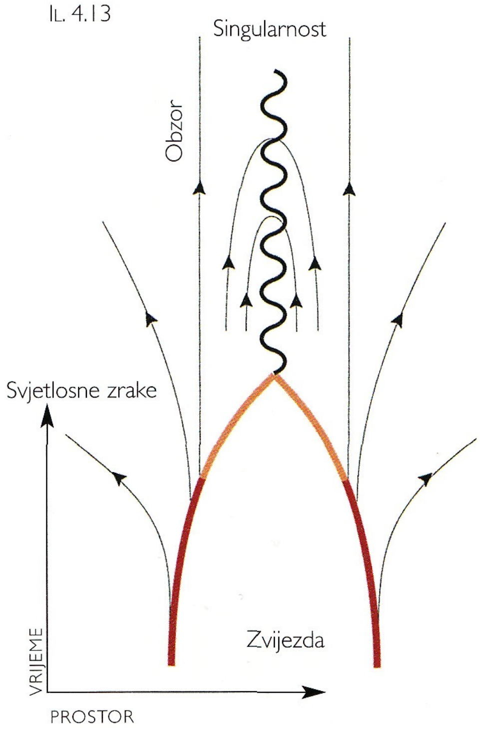
(IL.4.1 l)
Zvijezde nastaju u oblacima prašine i plina kakva je Orionova maglica.

Gravitacijsko polje zvijezde utjecat će na staze svjetlosnih zraka koje je napuštaju. Može se nacrtati dijagram na kojem je vrijeme prikazano na okomitoj osi, a udaljenost od središta zvijezde na vodoravnoj (v. il. 4.12, na str. 114). Na ovom dijagramu, površinu zvijezde predstavljaju dvije okomite crte, svaka s po jedne strane središta. Vrijeme se može mjeriti u sekundama, a udaljenost u svjetlosnim sekundama — udaljenost koju svjetlost prevali za jednu sekundu. Kad koristimo ove jedinice, brzina svjetlosti je 1; jedna svjetlosna sekunda u sekundi. To znači da je daleko od zvijezde i njenog gravitacijskog polja staza svjetlosne zrake na dijagramu predstavljena crtom koja stoji pod kutom od 45 stupnjeva u odnosu na okomitu os. No, bliže zvijezdi, zakrivljenost prostorvremena što je izaziva masa zvijezde promijenit će stazu svjetlosnih zraka, natjeravši ih da stoje pod manjim kutom u odnosu na okomitu os.

IL. 4.12



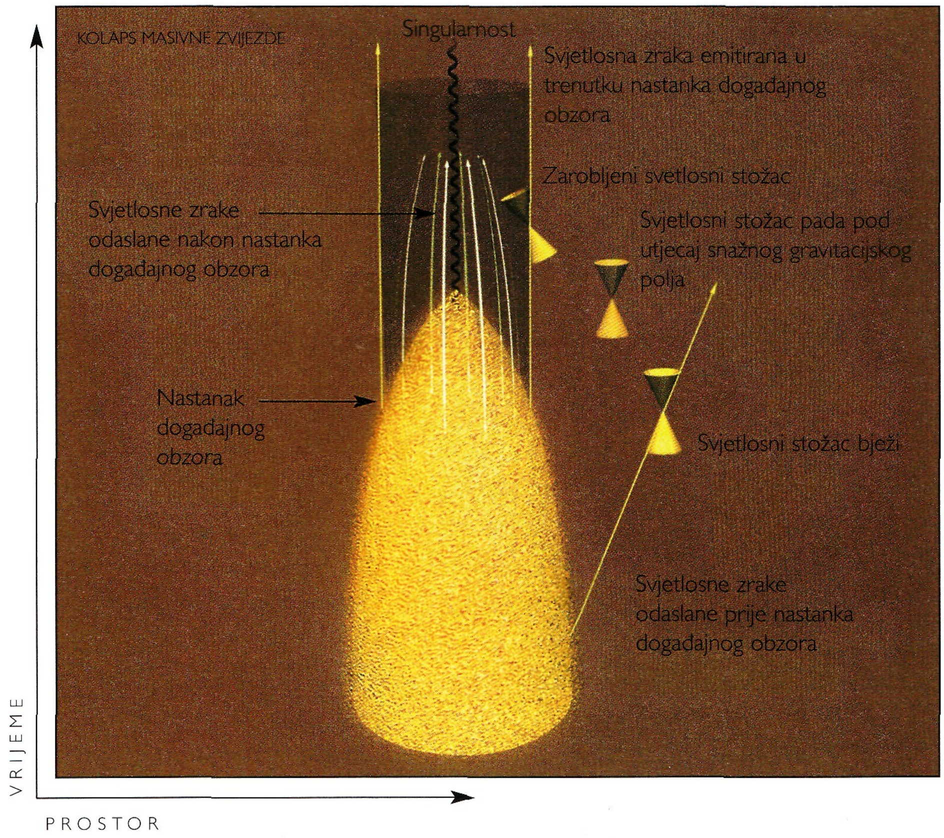
IL. 4.13



(IL 4.12) Prostorvrijeme oko neke normalne zvijezde. Svjetlosne zrake mogu pobjeći s njene površine (crvene okomite crte). Podalje od zvijezde svjetlosne zrake stoje pod kutom od 45 stupnjeva u odnosu na vertikalu, ali blizu zvijezde zakrivljenost prostorvremena zbog mase zvijezde prisiljava svjetlosne zrake da budu pod manjim kutom u odnosu na okomite crte (površinu zvijezde).

(Il. 4.13) Ako zvijezda kolabira (crvene crte se sreću u jednoj točki), zakrivljenost postaje toliko velika da se svjetlosne zrake pri površini savijaju unatrag. Nastaje crna jama, područje prostorvremena iz kojeg svjetlost ne može pobjeći.

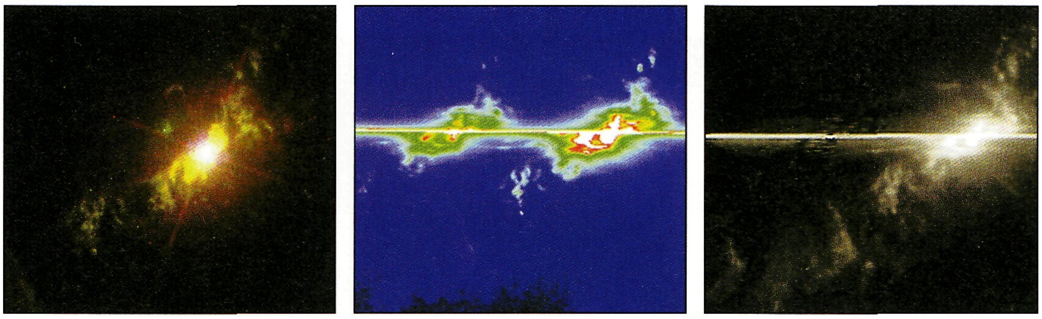
Masivne zvijezde pretvaraju svoj vodik u helij brže nego Sunce. To znači da im može ponestati vodika za samo nekoliko stotina milijuna godina. Nakon toga, takve zvijezde suočavaju se s energetskom krizom. Mogu, doduše, pretvarati helij u teže elemente kao što su ugljik i kisik, ali pri tim nuklearnim reakcijama ne oslobađa se dovoljno mnogo energije pa zvijezde gube toplinu, odnosno slabi im termički tlak koji je protuteža gravitaciji. Zvijezde se stoga skupljaju. Ako im je masa dvostruko veća od Sunčeve, termički tlak neće biti dovoljan da zaustavi skupljanje. One će kolabirati do nulte veličine i beskonačne gustoće, pretvarajući se u ono što se naziva singularnost (il. 4.13). Na dijagramu koji prikazuje vrijeme i udaljenost od središta, kako se zvijezda smanjuje, staze svjetlosnih zraka koje napuštaju površinu zatvarat će sve manje i manje kutove s okomitom osi. Kad zvijezda dostigne određeni kritični promjer, staza na dija-



gramu postaje okomita, što znači da se svjetlost zadržava na stalnoj udaljenosti od središta zvijezde, ne uspijevajući napustiti je. Ova kritična staza svjetlosti opisat će površinu koja se naziva događajni obzor i koja razdvaja područje prostorvremena odakle svjetlost može otići dalje od onoga iz kojeg to više ne može. Zakrivljenost prostorvremena savit će prema unutra svjetlost koju zvijezda zrači iza toga. Takva zvijezda postat će jedna od Michellovih tamnih zvijezda, ili, kako mi to danas zovemo, crna jama.

Obzori rub crne jame, tvore svjetlosne zrake kojima zamalo da je uspjelo pobjeći s nje; one ostaju lebdjeti na stalnoj udaljenosti od središta crne jame.

Kako se može otkriti crna jama kada iz nje ne zrači nikakva svjetlost? Odgovor glasi da crna jama i dalje gravitacijski djeluje na susjedna tijela jednako kao i zvijezda koja je doživjela kolaps. Da je Sunce crna jama i da je to postalo bez ikakvog gubitka svoje mase, planeti bi i dalje kružili oko njega kao i sada.



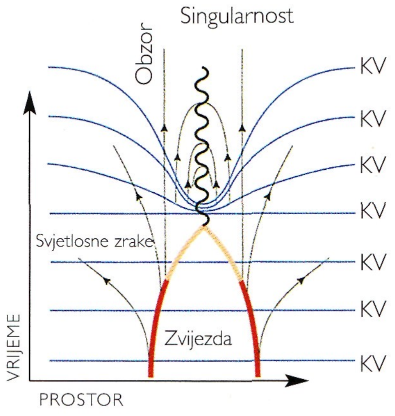
(iL.4.15)
CRNA JAMA U SREDIŠTU GALAKTIKE

Lijevo: Galaktika NGC 4151 snimljena širokokutnom kamerom za planete.

Sredina: Vodoravna linija koja presijeca sliku potječe od svjetlosti koju stvara crna jama u središtu 4151.

Desno: Slika prikazuje brzinu emisija kisika. Svi opažački podaci ukazuju na to da se u NGC 4151 nalazi crna jama mase sto milijuna masa Sunca.

(IL. 4.14)

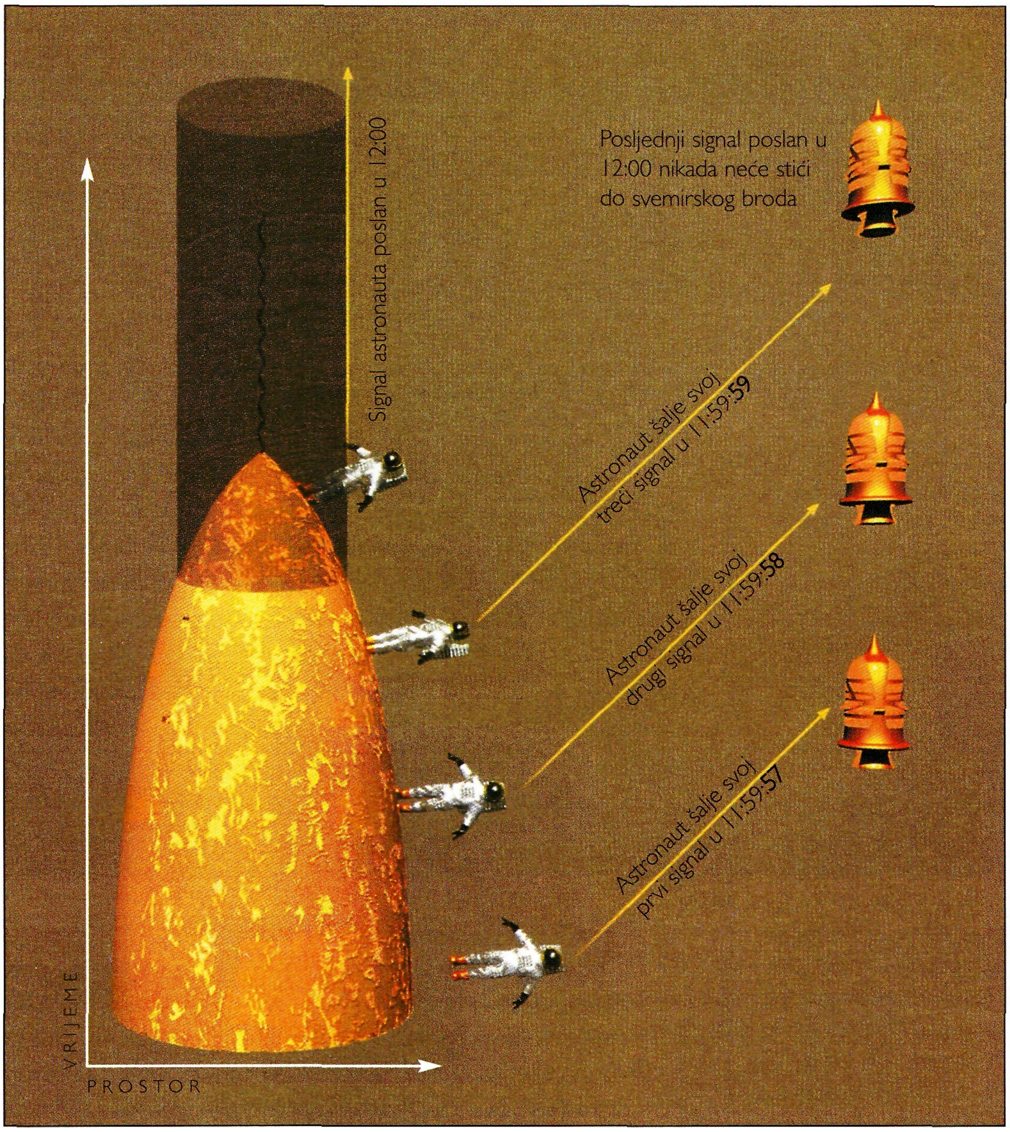


(KV — linije konstantnog vremena)

Jedan od načina traganja za crnim jamama je obratiti pažnju na tvar koja kruži oko nečega što očito djeluje kao zbijeni, masivni, ali nevidljivi objekt. Otkriven je izvjestan broj takvih sustava. Možda su najupečatljivije divovske crne jame koje se nalaze u središtima galaktika i kvazara (il. 4.14).

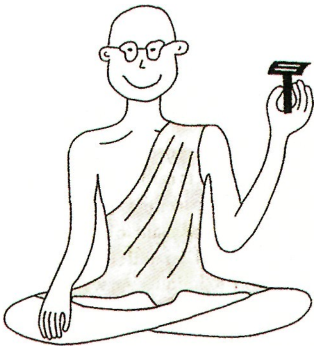
Svojstva crnih jama o kojima je do sada bilo riječi ne postavljaju pred determinizam nijedan veliki problem. Vrijeme će, doduše, stati za astronauta koji upadne u crnu jamu i stigne do singularnosti. No, prema općoj teoriji relativnosti, slobodno se mjeri vrijeme različitim hodom na različitim mjestima. Moglo bi se stoga ubrzati hod astronautove ure kako se on približava singularnosti, tako da ura i dalje bilježi beskonačan vremenski interval. Na dijagramu vremena i udaljenosti (il. 4.15), površine stalnih vrijednosti ovog novog vremena nagurale bi se sve u središtu, ispod točke gdje se singularnost javlja. U gotovo ravnom prostorvremenu daleko od crne jame podudarale bi se pak te nove vremenske koordinate s uobičajenom mjerom vremena.

Ovo vrijeme moglo bi se primijeniti u Schrodingerovoj jednadžbi da bi se izračunala valna funkcija za neke kasnije vremenske točke, pod pretpostavkom da je poznata valna funkcija u nekoj ranijoj točki. Determinizam je, dakle, i dalje na snazi. Vrijedi zapaziti, međutim, da se u kasnija vremena dio valne funkcije nalazi unutar crne jame, gdje ga ne može vidjeti vanjski promatrač. Prema tome, promatrač koji je dovoljno razu-



I lustracija prikazuje astronauta koji se spušta na kolabirajući! zvijezdu u 11:59:57 kad se ona steže ispod kritičnog polumjera, nakon čega gravitacija postaje tako jaka da nikakav signal ne može pobjeći. On šalje u pravilnim razmacima signale iz svoje ure prema svemirskom brodu koji kruži oko zvijezde.

Netko tko izdaleka promatra zvijezdu nikada neće vidjeti kako njena površina nestaje iza događajnog obzora i ulazi u crnu jamu. Izgledat će mu kao da stoji na kritičnom polumjeru, dok se hod ure na površini zvijezde usporava te potpuno zaustavlja.



Bez dlaka.

TEMPERATURA CRNE JAME

Crna jama zrači kao da je toplo tijelo s temperaturom (T) koja zavisi samo od njegove mase. Točnije govoreći, temperatura se izračunava slijedećom formulom:

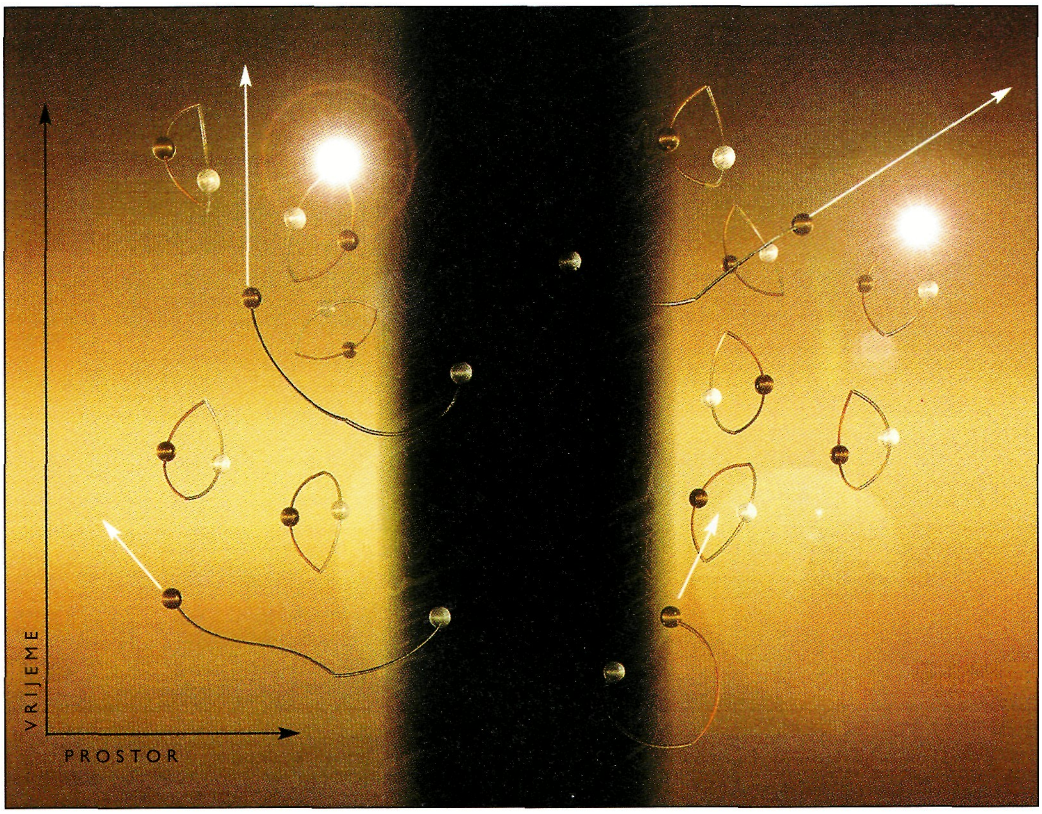
$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi \; k G M}$$

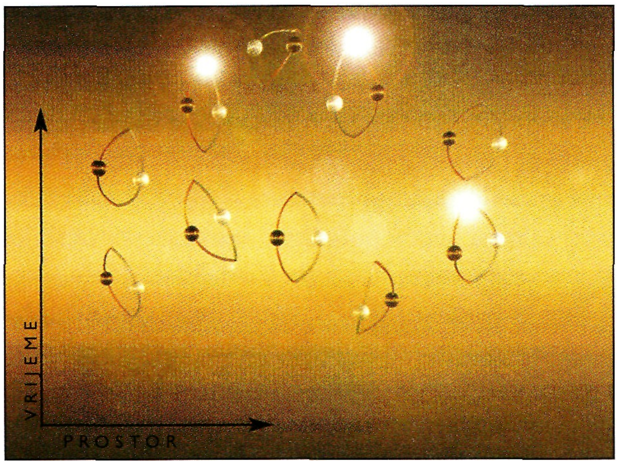
U ovoj formuli (c) označava brzinu svjetlosti, ($\hbar$) Planckovu konstantu, (G) Newtonovu konstantu gravitacije i (k) Boltzmanovu konstantu.
I na kraju, (M) je masa crne jame. Sto je crna jama manja, temperatura joj je viša. Ova formula nam govori da je temperatura crne jame mase nekoliko Sunčevih masa svega milijuntinku stupnja iznad apsolutne nule.

man da ne upadne u crnu jamu ne može upotrijebiti Schrodingerovu jednadžbu unatrag i izračunati valnu funkciju za ranija vremena. Da bi to učinio, ona ili on morali bi znati dio valne funkcije koji je unutar crne jame. Taj dio sadrži informacije o onome što je upalo u crnu jamu. To je potencijalno vrlo velika količina informacija zato što jedna crna jama zadane mase i brzine rotiranja može nastati iz vrlo velikog broja različitih skupina čestica; crna jama ne zavisi od prirode tijela čijim je urušavanjem stvorena. John Wheeler opisao je ovu okolnost riječima da "crna jama nema dlaka". Time je samo bilo potvrđeno da je prigovor Francuza glede naziva bio na mjestu.

Poteškoće oko determinizma javile su se kada sam ja otkrio da crne jame nisu potpuno crne. Kao što smo vidjeli u drugom poglavlju, kvantna teorija nam govori da polja ne mogu imati potpuno nultu vrijednost čak ni u onome što se naziva vakuum. Kad bi imala nultu vrijednost, to bi onda značilo da su im i vrijednost položaja i vrijednost brzine ravni nuli. Ovo bi, međutim, predstavljalo narušavanje načela neodređenosti, prema kojem nije moguće da su i položaj i brzina točno određeni. Sva polja moraju stoga imati u izvjesnom opsegu ono što se naziva vakuumske fluktuacije (u istom smislu u kome njihalo spomenuto u drugom poglavlju mora imati fluktuacije nulte točke). Vakuumske fluktuacije mogu se tumačiti na više načina koji izgledaju različiti, ali su, zapravo, matematički ekvivalentni. Promatrano s pozitivističkog gledišta, slobodno se može upotrijebiti ona slika koja je najkorisnija za rješavanje zadanog problema. U ovom slučaju uputno je zamisliti vakuumske fluktuacije kao parove virtualnih čestica koje se zajedno pojavljuju u nekoj točki prostorvremena, razdvajaju se, a zatim ponovo spajaju i međusobno poništavaju. "Virtualne" znači da se ove čestice ne mogu neposredno promatrati, ali se njihova posredna djelovanja *mogu* mjeriti. Ova djelovanja izuzetno se točno slažu s teorijskim predviđanjima (il. 4.16).

Ako je prisutna crna jama, jedan član para čestica može upasti u nju, ostavivši drugoga da slobodno ode u beskonačnost (il. 4.17). Nekome tko je daleko od crne jame izgledalo bi da je odbjegla čestica izašla iz crne jame. Spektar crne jame upravo je onakav kakav bismo očekivali iz toplog tijela





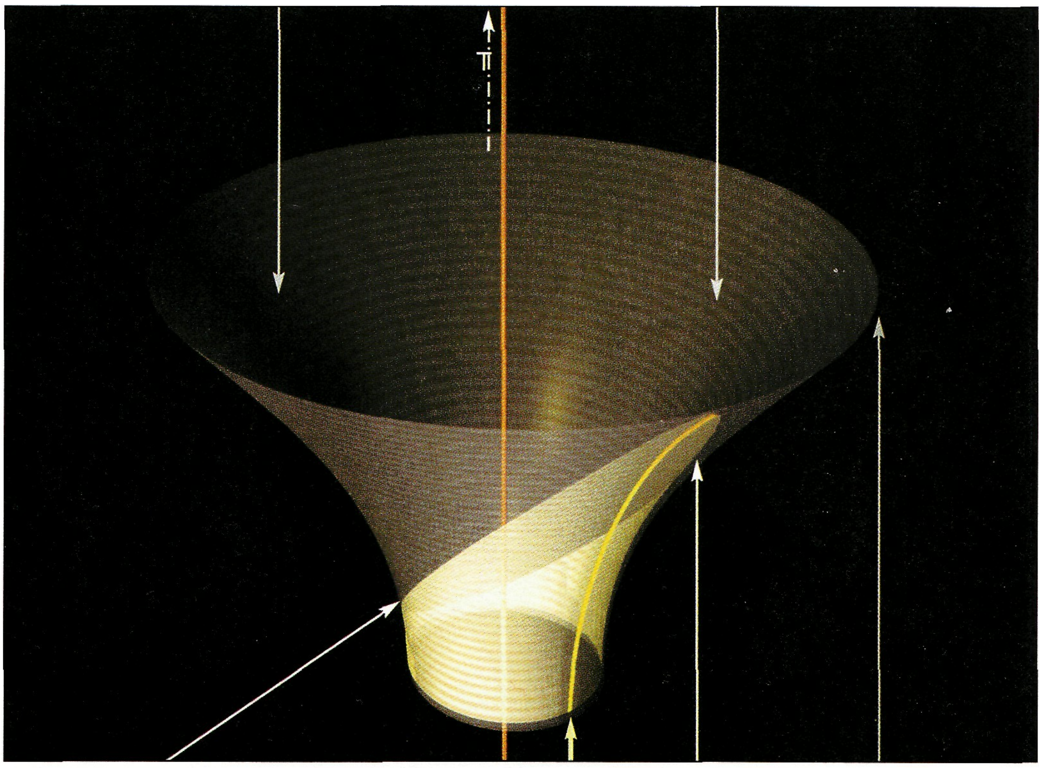
(IL.4.17)

Gore: Virtualne čestice koje se pojavljuju i međusobno poništavaju blizu događajnog obzora crne jame.

Jedan član para upada u crnu jamu, dok je njegov parnjak slobodan za bijeg. Za promatrača izvan događajnog obzora izgleda da to crna jama zrači čestice koje bježe s nje u svemir

(IL.4.16)

Lijevo: U praznom prostoru pojavljuju se parovi čestica, kratkotrajno opstaju, a onda se međusobno poništavaju.



(Il. 4.1 8)
De Sitterovo rješenje jednadžbi polja opće teorije relativnosti prikazuje svemir koji se širi na inflacijski način. Na ilustraciji je vrijeme zamišljeno u okomitom smjeru, a veličina svemira u vodoravnom smjeru. Prostorna udaljenost povećava se tako brzo da svjetlost dalekih galaktika nikada neće stići do nas, a tu je i događajni obzor granica područja koje ne možemo vidjeti, jednako kao kod crne jame.

temperature razmjerne gravitacijskom polju na obzoru — granici — crne jame. Drugim riječima, temperatura crne jame zavisi od njene veličine.

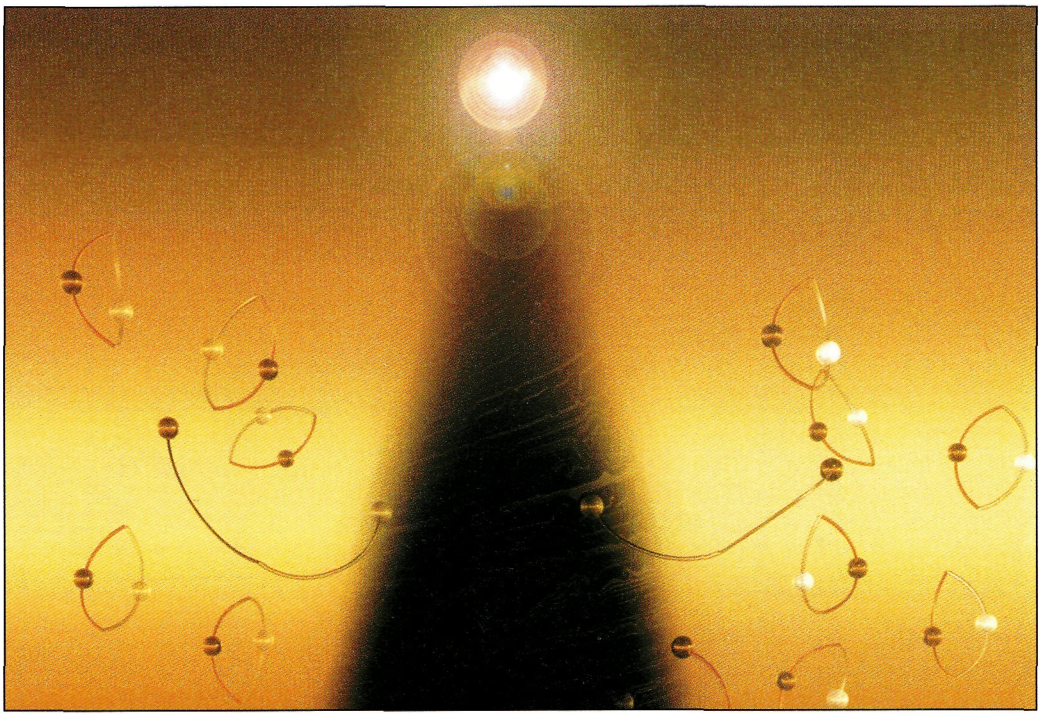
Crna jama od nekoliko Sunčevih masa imala bi temperaturu od jedne milijuntinke stupnja iznad apsolutne nule, dok bi veće crne jame imale još niže temperature. Dakle, svako zračenje iz takvih crnih jama bilo bi potpuno prigušeno mikrovalnim pozadinskim zračenjem od 2,7 stupnja zaostalim iz toplog Velikog praska. Bilo bi moguće otkriti zračenje iz znatno manjih i toplijih crnih jama, ali, kako se čini, njih nema mnogo. Baš šteta. Kad bi neka od njih bila otkrivena, ja bih dobio Nobelovu nagradu. Raspolažemo, međutim, posrednim promatračkim nalazima o ovom zračenju, a ti nalazi potječu iz ranog svemira.

Kao što je opisano u trećem poglavlju, smatra se da je svemir u vrlo ranoj povijesti prošao kroz inflacijsko razdoblje, tijekom kojeg se širio sve većim ubrzanjem. Sirenje je u tom razdoblju bilo tako brzo da su neki objekti postali previše udaljeni od nas da bi njihova svjetlost ikada stigla do Zemlje; svemir se širio previše i prebrzo dok je ta svjetlost putovala prema nama. Postojao bi, dakle, neki obzor u svemiru, poput obzora crne jame, koji bi razdvajao područje iz kojeg svjetlost može stići do nas od onog iz kojeg ne može (il. 4.18).

Vrlo slični razlozi pokazuju da bi trebalo biti i toplinskog zračenja s ovog obzora. Kod toplinskog zračenja očekuje se spektar karakterističan za fluktuacije gustoće. U ovom slučaju, ove fluktuacije gustoće širile bi se zajedno sa širenjem svemira. Kada njihova dužina postane veća od veličine dogadajnog obzora, one bi se ukočile, tako da bismo ih mi danas zapažali kao male varijacije temperature pozadinskog zračenja zaostalog iz ranog svemira. Podaci promatranja ovih varijacija iznimno se slažu s predviđanjima toplinskih fluktuacija.

Iako su promatrački nalazi vezani za zračenje crnih jama donekle posredni, svi koji su proučavali ovaj problem slažu se u tome da tog zračenja mora biti, jer je to u skladu s našim drugim teorijama koje su promatrački potvrđene. Ovo ima značajne posljedice na determinizam. Zračenje iz crne jame odnosilo bi energiju, što onda znači da će crna jama gubiti masu i postajati sve manja. Odavde bi dalje slijedilo da će joj temperatura rasti i da će se snaga zračenja povećavati. Crna jama će se na kraju rasplinuti do nulte mase. Ne znamo kako izračunati što se to događa u toj točki, ali jedini prirodni, razložni ishod čini se da je potpuni nestanak crne jame. Što onda biva s dijelom valne funkcije unutar crne jame i informacijama koje ona sadrži o onome što je upalo unutra? Prva pretpostavka mogla bi biti da će se ovaj dio valne funkcije i informacije koje on sadrži opet pojaviti kada crna jama konačno nestane. Informacije se, međutim, ne mogu prenositi potpuno besplatno, u što se uvjerite svaki put kad dobijete račun za telefon.

Za prijenos informacija potrebna je energija, a ima sasvim malo preostale energije u završnim stadijima crne jame. Jedini vjerojatni način na koji bi informacije



(IL.4.19)
Pozitivna energija koju odnosi toplinsko zračenje s obzora crne jame smanjuje njenu masu. Kako crna jama gubi masu, temperatura joj raste pa joj se i snaga zračenja povećava, tako da sve brže i brže gubi masu. Ne znamo što se događa kada masa postane sasvim mala, ali čini se da je najvjerojatniji ishod potpuni nestanak crne jame.

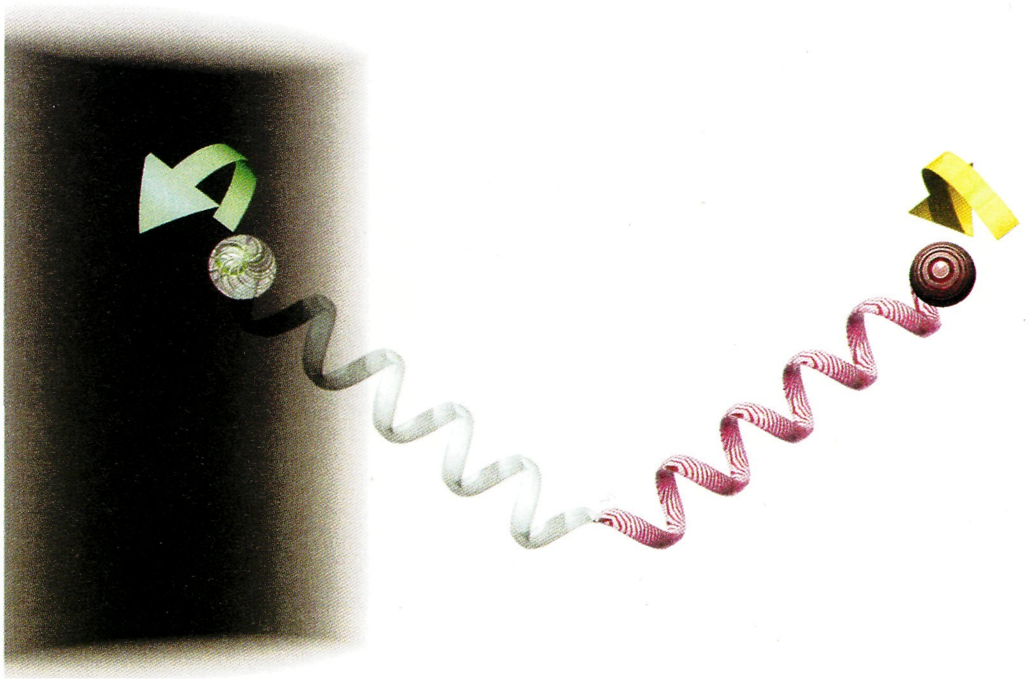
mogle izaći van bio bi da neprekidno istječu zajedno sa zračenjem, umjesto da čekaju na ovo završno stanje. No, s obzirom na činjenicu da jedan član para virtualnih čestica pada u crnu jamu, dok drugi uspijeva umaknuti, ne izgleda uvjerljivo da ovaj drugi (bjegunac) ima neke veze s onim stvarima koje su unutra upale niti da odnosi informacije o tome. Prema tome, preostaje, čini se, samo jedan odgovor: informacije u dijelu valne funkcije unutar crne jame su izgubljene (il. 4.19).

Ovaj gubitak informacija ima značajne posljedice za determinizam. Prije svega, ustanovili smo da čak i kada biste znali valnu funkciju nakon nestanka crne jame, ne biste mogli izvesti Schrodingerovu jednadžbu unatrag i izračunati kakva je bila valna funkcija prije negoli je crne jama oblikovana. Kakva je valna funkcija bila zavisilo bi djelomično o njenom dijelu koji je izgubljen u crnoj jami. Navikli smo misliti da prošlost možemo čitati kao otvorenu knjigu. No, ako se informacije gube u crnim jamama, onda to nije moguće. U prošlosti se moglo dogoditi svašta, a mi to više nismo u stanju rekonstruirati.

(Il 4.20)
U Einstein-Podolsky-Rosenovom misaonom pokusu, promatrač koji je izmjerio spin jedne čestice znat će smjer spina druge čestice.

Dakako, astrologe i one koji traže njihove usluge više zanima predviđanje budućnosti nego rekonstrukcija prošlosti. Na prvi pogled, moglo bi izgledati da nas gubitak dijela valne funkcije u crnoj jami neće smetati u predviđanju valne funkcije izvan crne jame. Ali, ovaj gubitak ipak utječe na predviđanja, u što se možemo uvjeriti kroz jedan misaoni pokus kojeg su izložili Einstein, Boris Podolskv i Nathan Rosen u tridesetim godinama prošlog stoljeća.

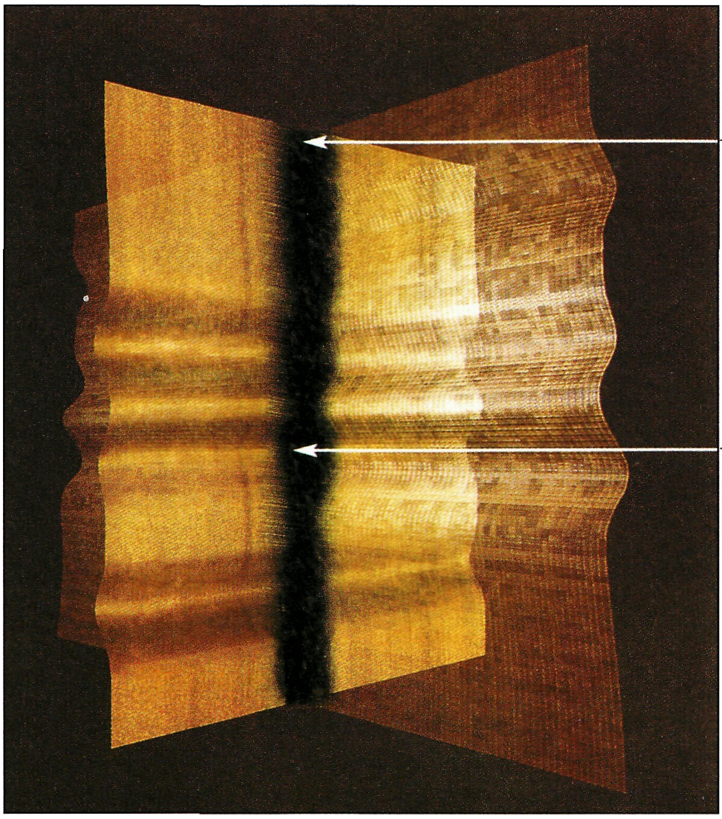
Zamislimo da se jedan radioaktivni atom raspadne i pošalje u suprotnim smjerovima dvije čestice suprotnih spinova. Promatrač koji promatra samo jednu česticu ne može predvidjeti hoće li njen spin biti desni ili lijevi. Ali ako bi promatrač mjerenjem ustanovio da ta čestica ima desni spin, onda bi mogao pouzdano predvidjeti da je spin druge čestice lijevi, i obrnuto (il. 4.20). Einstein je smatrao da ovo dokazuje da je kvantna teorija besmislena: druga čestica mogla bi se u međuvremenu nalaziti već na suprotnoj strani Galaktike, ali bi se ipak trenutno znalo kakav je njen spin. No, većina drugih znanstvenika slaže se da je Einstein u krivu, a ne kvantna teorija. Misaoni



(IL.4.21)
Par virtualnih čestica ima vainu funkciju koja predviđa da će im spinovi biti suprotni. Ali ako jedna čestica upadne u crnu jamu, nemoguće je sa sigurnošću predvidjeti spin njenog parnjaka.

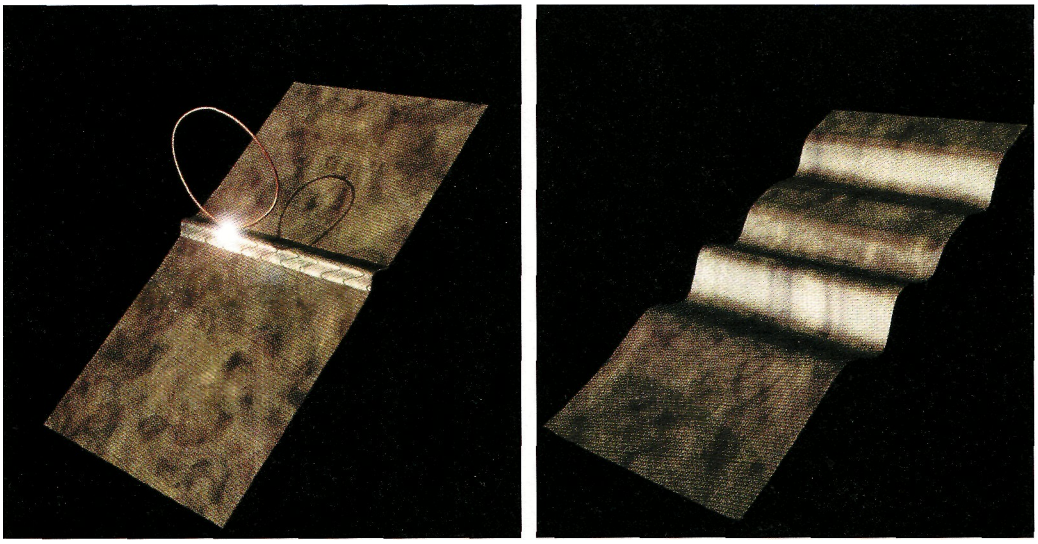
pokus Einsteina, Podolskog i Rosena ne pokazuje da se može slati informacija brzinom većom od svjetlosne. To je taj besmisleni dio. Ne može se *odabrati* da izmjerena čestica ima desni spin, pa se tako ne može propisati da ona druga, promatraču udaljena, ima lijevi.

Zapravo, ovaj misaoni pokus točno pokazuje što se događa sa zračenjem crne jame. Par virtualnih čestica imat će valnu funkciju koja predviđa da će spin dva člana nesumnjivo biti suprotan (il. 4.21). Ono što bismo željeli učiniti jest da predvidimo spin i valnu funkciju izlazne čestice, što bismo mogli kada bismo bili u stanju promatrati ulaznu česticu. Ali ta čestica se nalazi u crnoj jami, gdje joj se spin i valna funkcija ne mogu izmjeriti. Kao posljedica toga, nije moguće predvidjeti spin ili valnu funkciju odbjegle čestice. Ona može imati različite spinove i različite valne funkcije, s raznim vje-



(IL. 4.22)
Crne jame mogu se zamisliti kao sjecišta p-brana u dodatnim dimenzijama prostor-vremena. informacija o unutrašnjim stanjima crnih jama bile bi uskladištene kao valovi na p-branama.

rojatnostima, a ne jedan jedini spin ili valnu funkciju. Izgleda, dakle, da je naša sposobnost predviđanja budućnosti dodatno ograničena. Klasična Laplaceova zamisao da se mogu predvidjeti i položaji i brzine čestica morala se preinačiti kada je načelo neodređenosti pokazalo da se ne mogu točno izmjeriti i položaji i brzine. I dalje je, međutim, moguće izmjeriti valnu funkciju pa uz pomoć Schrodingerove jednadžbe predvidjeti što će biti u budućnosti. Ovo bi omogućilo pouzdano predviđanje neke kombinacije položaja i brzine — što je polovina onoga što se moglo predvidjeti prema Laplaceovim zamislima. Sa sigurnošću možemo predvidjeti da čestice imaju suprotan spin, ali ako jedna čestica upadne u crnu jamu, onda se više ništa ne može pouzdano predvidjeti o drugoj čestici. Ovo znači da nema *nijednog* mjerenja izvan crne jame koje se može pouzdano predvidjeti:



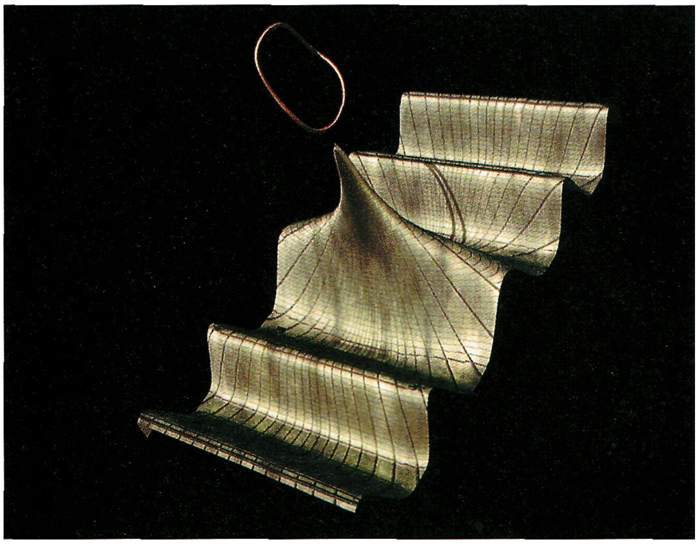
(1) (2)

(IL 4.23)
Cestica koja upada u crnu jamu može se zamisliti kao zatvorena petlja strune koja pogađa p-branu (1). Ona će pobuditi valove u p-brani (2). Valovi se mogu susresti i uzrokovati odvajanje dijela p-brane u obliku zatvorene strune (3). Bila bi to čestica koju zrači crna jama.

naša sposobnost da pravimo točna predviđanja bila bi svedena na nulu. I tako, možda astrolozi, kad je o predviđanju budućnosti riječ, nimalo ne zaostaju za zakonima prirode.

Mnogim fizičarima nije se sviđalo ovo ograničenje determinizma pa su predložili pretpostavku da informacije o onome što je unutar crne jame mogu ipak nekako izaći van. Godinama je tinjala tek krhka nada da će se pronaći način spasa za informacije. No 1996. su Andrew Strominger i Cumrun Vafa učinili značajan napredak. Zamislili su da se crna jama sastoji od nekog broja građevnih blokova zvanih p-brane (v. str. 54).

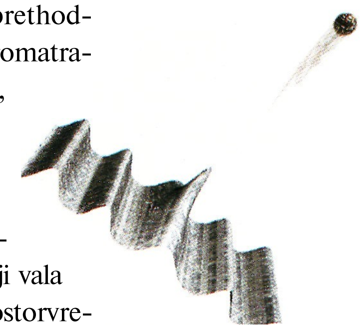
Sjetimo se da se p-brane mogu zamisliti kao neke ploče koje se gibaju kroz tri dimenzije prostora, ali također i kroz sedam dodatnih dimenzija koje ne zamjećujemo (vidjeti il. 4.22, str. 125). U nekim slučajevima može se pokazati da je broj valova na p-branama jednak opsegu informacija za koje bi se očekivalo da ih sadrži crna jama. Ako čestice pogode p-brane, one izazivaju dodatne valove na njima. Slično tome, ako se valovi koji se gibaju na p-branama u raznim pravcima skupe u nekoj točki, mogu proizvesti tako visok

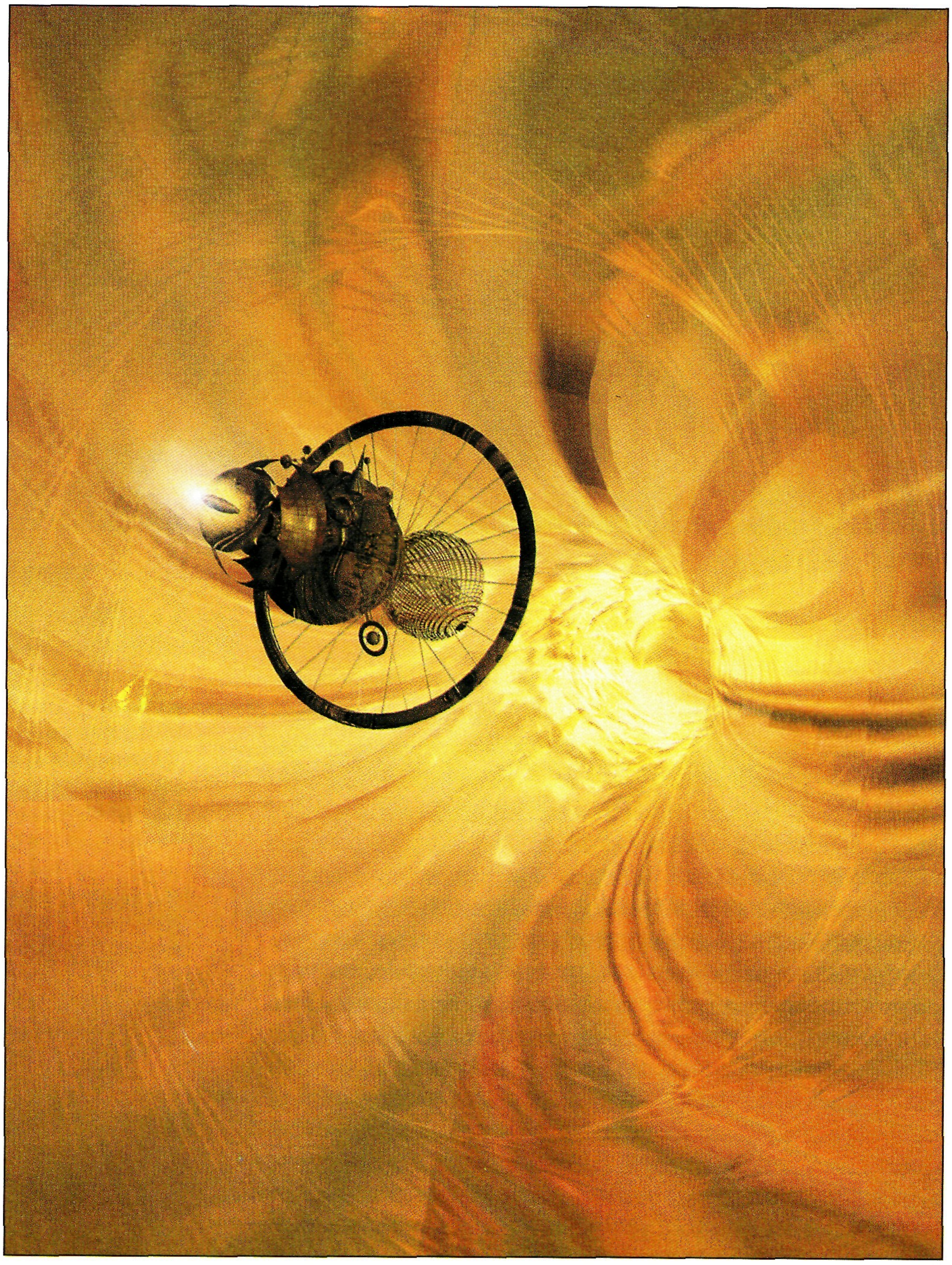


(3)

vrh da se dio p-brane odvaja i odlazi u obliku čestice. P-brane mogu kao i crne jame apsorbirati i emitirati čestice (il. 4.23).

Model p-brana može se smatrati učinkovitom teorijom; iako, naime, ne moramo bezuvjetno vjerovati u to da stvarno postoje neke ploče koje se gibaju kroz ravno prostorvrijeme, crne jame mogle bi se ponašati tako kao da se sastoje od ovakvih ploča. Slično je s vodom: ona se sastoji od milijarda i milijarda molekula H2O sa složenim međudjelovanjima. Ali homogena ravna tekućina je vrlo dobar učinkovit model. Matematički model crnih jama koje se sastoje od p-brana daje rezultate slične onima koji potječu iz prethodno opisane zamisli o paru virtualnih čestica. Prema tome, promatrano s pozitivističkog gledišta, to je podjednako dobar model, barem za određene klase crnih jama. Kod ovih klasa, model p-brana predviđa potpuno isti opseg emitiranja kao i model para virtualnih čestica. Postoji, međutim, jedna značajna razlika: u modelu p-brana informacije o onome što ulazi u crnu jamu bile bi uskladištene u valnoj funkciji vala na p-branama. P-brane se smatraju površinama u *ravnom* prostorvre-





menu i zbog toga vrijeme teče ravnomjerno, staze svjetlosnih zraka neće biti savijene, a informacije u valovima neće se izgubiti. Naprotiv, informacije će konačno izaći iz crne jame u sklopu zračenja iz p-brana.

Shodno tome, prema modelu p-brana, pomoću Schrodingerove jednadžbe može se izračunati kakva će biti valna funkcija u nekom kasnijem vremenu. Ništa neće biti izgubljeno i vrijeme će ravnomjerno nastaviti teći. Imat ćemo potpuni determinizam u kvantnom smislu.

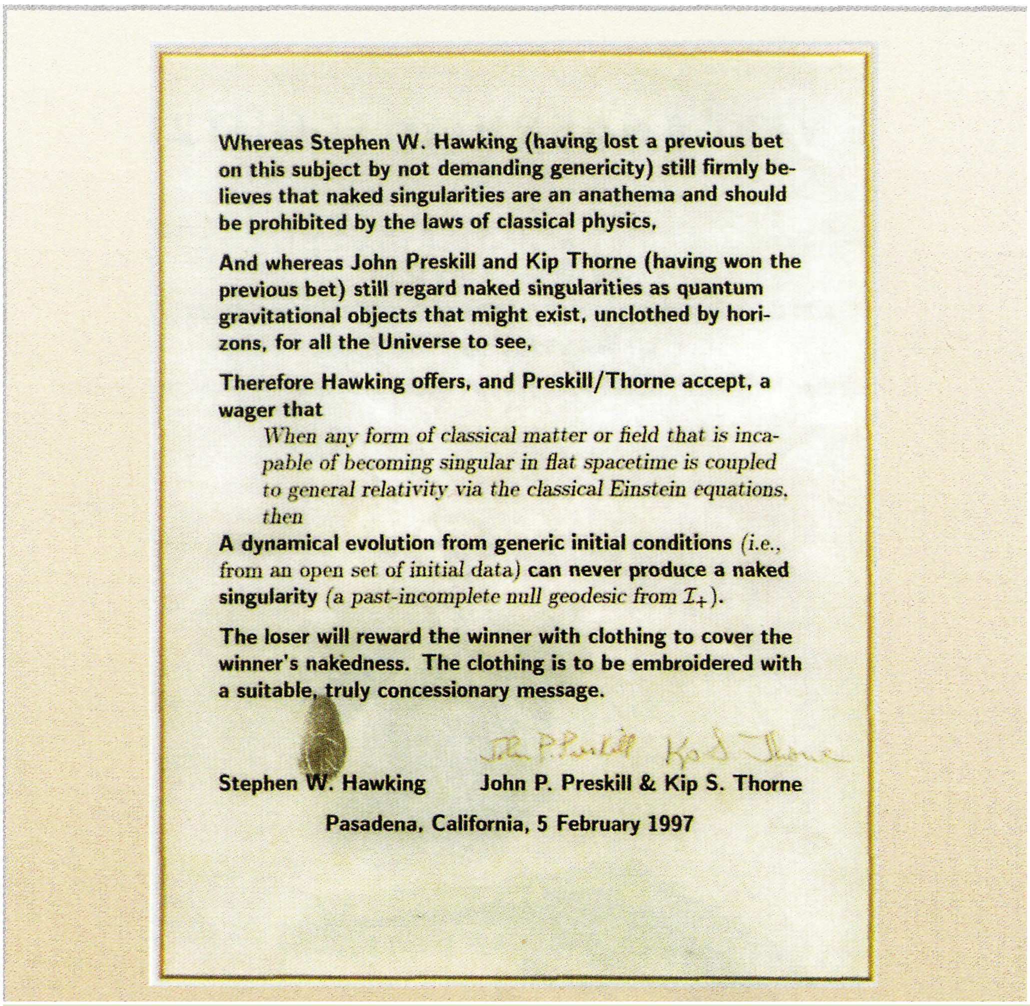
Koja je, dakle, od ovih slika točna? Biva li dio valne funkcije izgubljen u crnoj jami ili sve informacije ponovo izranjaju, kao što to proizlazi iz modela p-brana? To je jedno od temeljnih pitanja suvremene teorijske fizike. Mnogi stručnjaci smatraju da najnovija istraživanja pokazuju da nema gubitka informacija. Svijet je siguran i predvidiv i ništa se neočekivano neće dogoditi. Ali nije sigurno da je baš tako. Ako se ozbiljno shvati Einsteinova opća teorija relativnosti, mora se dopustiti mogućnost da se prostorvrijeme vezuje u čvor u kome se gube informacije. Kad je zvjezdani brod *Enterprise* prošao kroz crvotočinu, zbilo se nešto neočekivano. Znam to dobro zato što sam se nalazio na njemu, igrajući poker s Newtonom, Einsteinom i Dataom. Doživio sam veliko iznenađenje. Pogledajte tko mi se pojavio na koljenima.

Ljubaznošću Paramount Pictures
ZVJEZDANE STAZE: SLIJEDEĆA GENERACIJA
Copyright© 2001 by Paramount Pictures.
All Rights Reserved

POGLAVLJE 5

ZAŠTITA PROŠLOSTI

Je li moguće putovanje kroz vrijeme?
Bi li neka napredna civilizacija mogla putovati natrag kroz vrijeme i promijeniti prošlost?



Whereas Stephen W. Hawking (having lost a previous bet on this subject by not demanding genericity) still firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne (having won the previous bet) still regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist, unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager that

When any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, then

A dynamical evolution from generic initial conditions (*i.e.*, from an open set of initial data) can never produce a naked singularity (*a past-incomplete null geodesic from* $\mathcal{I}_+$).

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable, truly concessionary message.

Stephen W. Hawking   John P. Preskill & Kip S. Thorne

Pasadena, California, 5 February 1997

Stephen W. Hawking (nakon sto je već izgubio jednu okladu o ovom slučaju, ne tražeći općenitost) i dolje čvrsto vjeruje do su gole singularnosti anatema koju treba zabraniti zakonima klasične fizike.

Naprotiv, John Preskill i Kip Thorne (koji su dobili prethodnu okladu) i dalje smatraju da su gole singularnosti kvantni gravitacijski objekti koji bi mogli postojati, nezaklonjeni obzorima, tako da ih čitav svemir može vidjeti.

U tom smislu, Hawking predlaže, a Preskill i Tborne prihvaćaju slijedeću okladu:

Kada se bilo koji oblik klasične materije ili polja, koji ne mogu postati singularni u ravnom prostorvremenu, povezu s općom relativnošću preko klasičnih Einsteinovih jednadžbi, onda

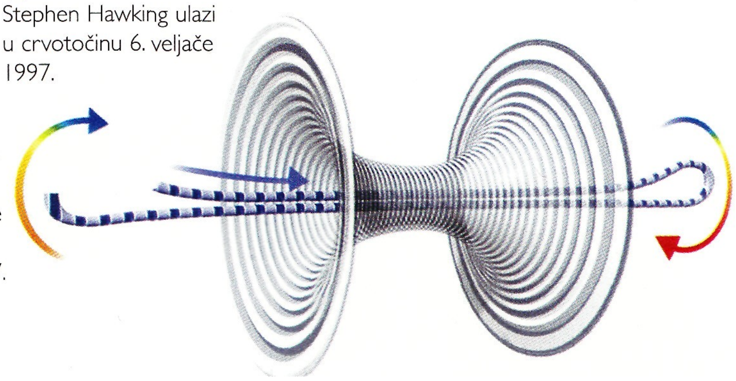
Dinamička evolucija iz općih početnih uvjeta (odnosno, iz otvorenog skupa početnih podataka) nikada ne može proizvesti golu singularnost (prošlo-nepotpuni nulti geodezik iz 1+).

Gubitnik će dati dobitniku odjeću kojom će ovaj pokriti svoju golotinju. Odjeća će imati izvezenu prikladnu poruku o pravu na njeno korištenje.

Stephen Hawking
John P. Preskill & Kip S. Thorne
Posadena, Kalifornija, 5. veljače 1997.

(1)
Stephen Hawking ulazi u crvotočinu 6. veljače 1997.

(3)
Stephen Hawking sklapa okladu koju ne može izgubiti 5. veljače 1997.

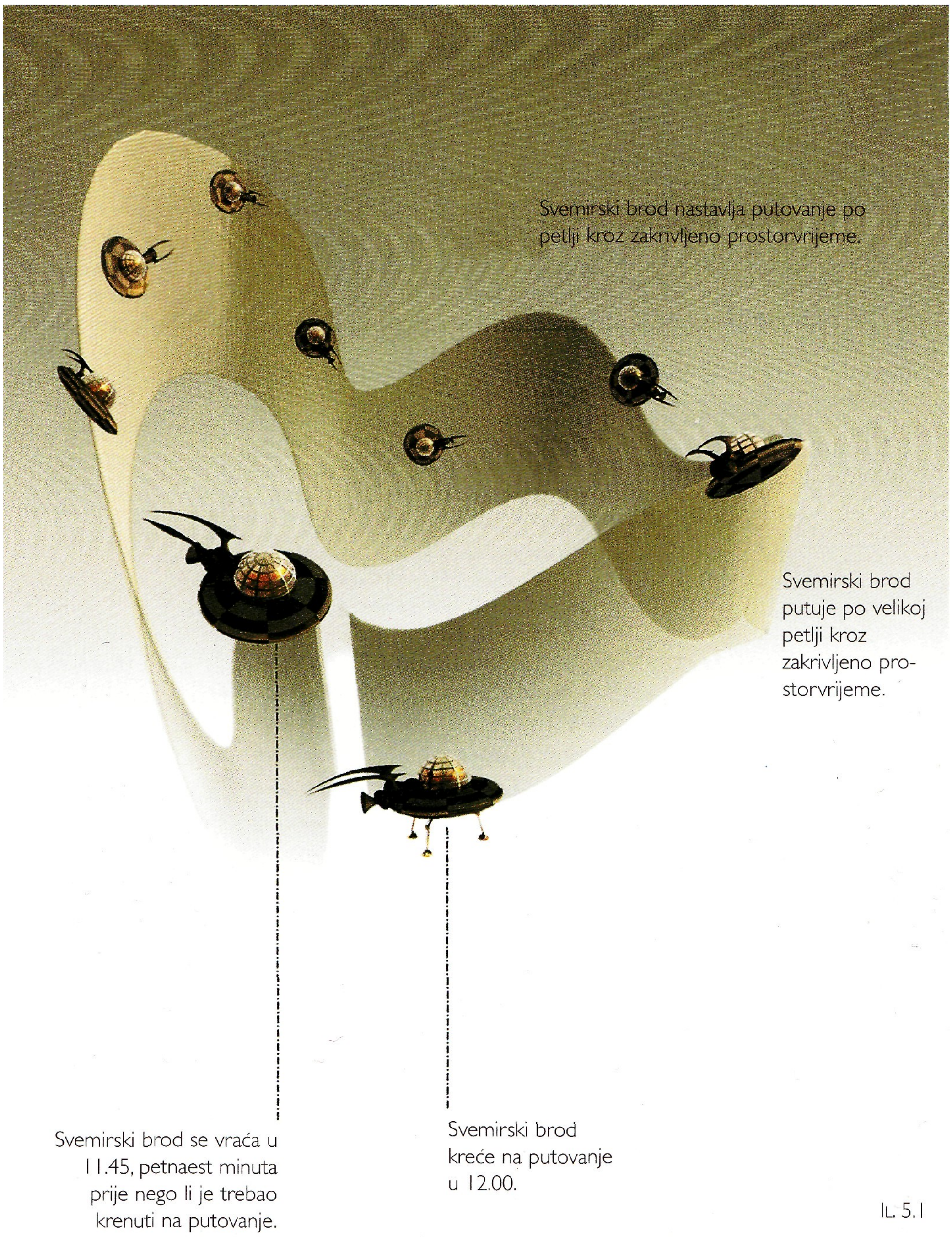


(2)
U budućnosti se dokazuje da dinamička evolucija iz općih uvjeta nikada ne može proizvesti golu singularnost.

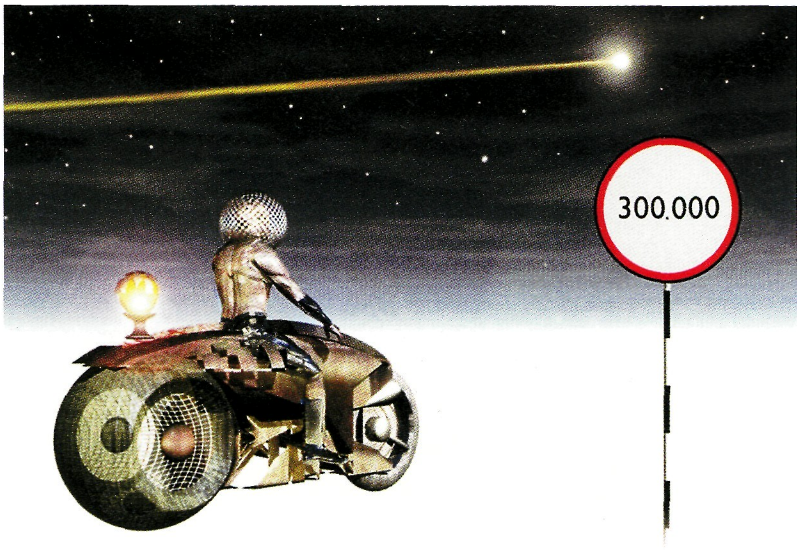
MOJ PRIJATELJ I KOLEGA KIP THORNE, S KOJIM SAM SE U VIŠE navrata kladio (vidjeti lijevo), ne spada medu one koji slijede prihvaćene pravce u fizici samo zato što to čine svi ostali. Ovakav pristup dao mu je hrabrost da bude prvi ozbiljan znanstvenik koji je razmotrio putovanje kroz vrijeme kao praktičnu mogućnost.

Kip Thorne

Nezgodno je javno razmišljati o putovanju kroz vrijeme. Izlažete se opasnosti da vas optuže za rasipanje novca poreznih obveznika na smiješne projekte, ili pak zahtijevaju da istraživanje postane tajno zato što ima vojnu vrijednost. Kako bismo se, međutim, uopće mogli zaštititi od nekoga tko ima vremeplov? Ta osoba mogla bi promijeniti povijest i zavladati svijetom. Samo nas je nekolicina koji smo dovoljno nesmotreni da se latimo posla na području koje je politički tako sklisko u krugovima fizičara. Mi skrivamo tu činjenicu tako što koristimo stručne izraze koji su šifre za putovanje kroz vrijeme.

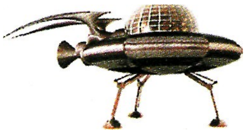

Svemirski brod nastavlja putovanje po petlji kroz zakrivljeno prostorvrijeme.
Svemirski brod putuje po velikoj petlji kroz zakrivljeno prostorvrijeme.
Svemirski brod se vraća u 11.45, petnaest minuta prije nego li je trebao krenuti na putovanje.
Svemirski brod kreće na putovanje u 12.00.

IL. 5.1



Temelj svih suvremenih rasprava o putovanju kroz vrijeme je Einsteinova opća teorija relativnosti. Kao što smo vidjeli u prethodnim poglavljima, Einsteinove jednadžbe dodijelile su prostoru i vremenu dinamičnost time što opisuju kako ih materija i energija u svemiru zakrivljuju i izobličuju. U općoj teoriji relativnosti, nečije osobno vrijeme, mjereno njegovom urom, uvijek će doduše ići naprijed, baš kao i u Newtonovoj teoriji ili u ravnom prostorvremenu specijalne teorije relativnosti, no prostorvrijeme može biti i toliko savijeno da se otisnete na putovanje svemirskim brodom i vratite se s njega prije nego što ste uopće krenuli (il. 5.1).

Jedan od načina na koji se ovo može izvesti je pomoću crvotočina, hipotetskih prostorvremenskih cijevi spomenutih u četvrtom poglavlju, koje povezuju različita područja prostora i vremena. Putovanje se svodi na to da uvedete svemirski brod u jedan otvor crvotočine, a izađete iz drugog, na nekom drugom mjestu i u drugo vrijeme (il. 5.2, v. str. 136).



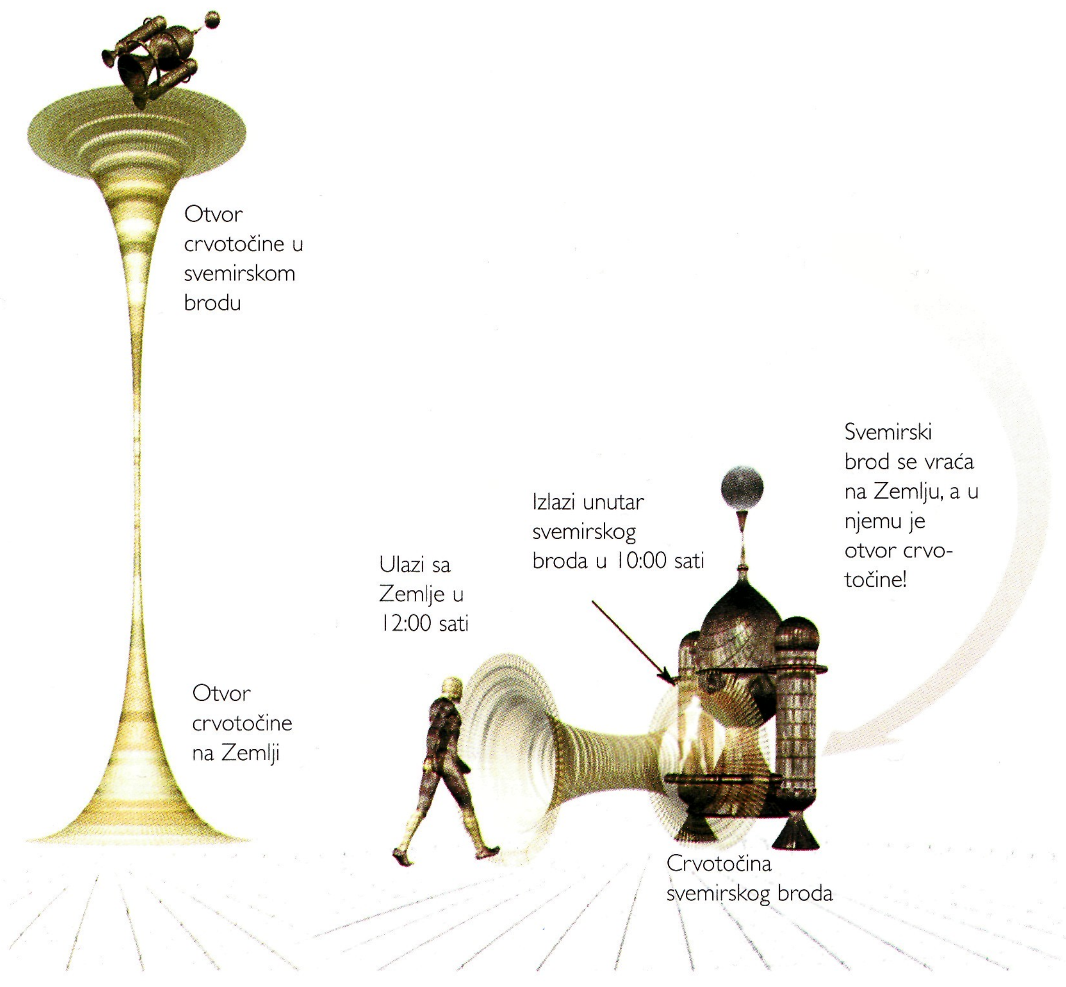
Crvotočine bi bile, kad bi postojale, rješenje za problem ograničenja brzine u svemiru: bilo bi potrebno više desetaka

tisuća godina da se prijeđe s kraja na kraj Galaktike u svemirskom brodu koji se kreće brzinom samo nešto manjom od svjetlosne, kako to relativnost nalaže. Ali, kroz povoljno odabranu crvotočinu mogli biste prevaliti put do suprotnog kraja Galaktike i natrag, a da ne zakasnite na večeru. Može se čak pokazati da biste se uz pomoć crvotočina čak mogli vratiti i prije no što ste krenuli na putovanje. U tom slučaju, moglo bi vam pasti na pamet i da uništite, na primjer, raketu na lansirnoj rampi kako biste zbog nekog razloga onemogućili svoj odlazak. Ovo je varijacija onoga što se naziva "paradoks djeda": što će se dogoditi ako se vratite u prošlost i ubijete svog vlastitog djeda prije nego što je vaš otac uopće začet? (Vidjeti il. 5.3, str. 138.)

Dakako, ovo je paradoks samo ako vjerujete da ste potpuno slobodni u svojim djelima kad putujete natrag u prošlost. U ovoj

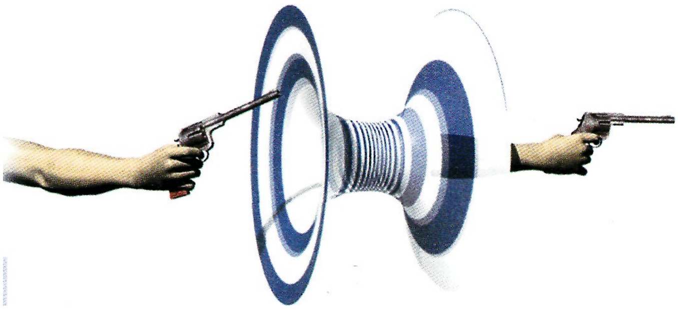
(IL. 5.2) DRUGA VARIJACIJA PARADOKSA BLIZANACA

(1)
Ako postoji crvotočina čija su dva kraja međusobno blizu, mogli biste proći kroz nju i izaći u isto vrijeme.



(2)
Može se zamisliti situacija u kojoj je jedan kraj crvotočine na svemirskom brodu koji se otisnuo na dugo putovanje, dok je drugi kraj ostao na Zemlji.

(3)
Zbog djelovanja paradoksa blizanaca, kada se brod vrati, manje je vremena prošlo na brodskom otvoru crvotočine nego na zemaljskom. To bi značilo da ako uđete u otvor na Zemlji, izašli biste iz svemirskog broda u neko ranije vrijeme.



(IL. 5.3)
Može li metak ispaljen kroz crvotočinu u neko ranije doba pogoditi onoga tko je pucao?

knjizi nećemo se upuštati u filozofsku raspravu o slobodnoj volji. Umjesto toga, usmjerit ćemo se na razmatranje pitanja dopuštaju li zakoni fizike da prostorvrijeme bude toliko savijeno da se neko tijelo makroskopskih veličina, kakvo je svemirski brod, može vratiti u vlastitu prošlost. Prema Einsteinovoj teoriji, svemirski brod giba se nužno brzinom koja je manja od lokalne brzine svjetlosti, idući onim što se naziva staza vremenskog tipa kroz prostorvrijeme. Pitanje se, dakle, može postaviti i stručnije: dopušta li prostorvrijeme zakrivljenosti vremenskog tipa koje su zatvorene — takve, naime, koje se stalno iznova vraćaju na svoje polazište? Ovakve staze zvat ću "vremenske petlje".

Tri su razine na kojima možemo odgovoriti na ovo pitanje. Prvi je opća teorija relativnosti koja pretpostavlja da svemir ima sasvim određenu povijest bez ikakvih neizvjesnosti. Ova klasična teorija daje nam sasvim cjelovitu sliku. No, kao što smo vidjeli, ona ne može biti potpuno točna zbog poznate nam neodređenosti i kvantne fluktuacije.

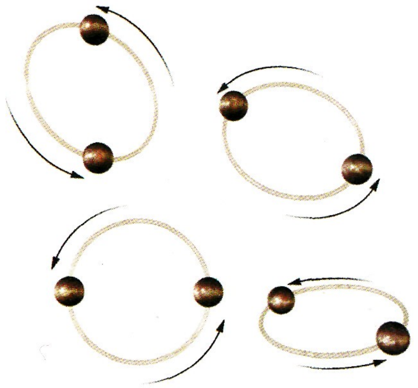
Može se stoga postaviti pitanje o putovanju kroz vrijeme na drugoj razini — na razini poluklasične teorije. Pod tim mislimo da se svemirska tvar ponaša prema kvantnoj teoriji, suglasno neodređenosti i kvantnim

KOZMIČKE STRUNE

Kozmičke strune su dugački, teški objekti sićušnog poprečnog presjeka, koje su možda nastale u ranim fazama svemira. Nakon što su jednom bile stvorene, izduživale su se širenjem svemira, tako da se sada jedna kozmička struna može pružati cijelom dužinom vidljivog svemira.

Na postojanje kozmičkih struna ukazale su suvremene teorije čestica koje predviđaju da je u vrućim ranim razdobljima razvoja svemira materija bila u simetričnoj fazi, slično tekućoj vodi — koja je simetrična: ista je u svakoj točki i u svim pravcima — a ne kristalima leda koji imaju diskretnu strukturu.

Kako se svemir hladio, simetrija iz ranog razdoblja mogla je biti narušena na različite načine u međusobno udaljenim područjima. Shodno tome, svemirska tvar zadobila bi različita osnovna stanja u pojedinim područjima. Kozmičke strune su konfiguracije materije na granicama između tih područja. Njihov nastanak predstavljao je, dakle, nužnu posljedicu činjenice da se različita područja nisu mogla usuglasiti o svojim osnovnim stanjima.



(IL 5.4)
Dopušta li prostorvrijeme zatvorene vremenske krivulje koje se stalno iznova i iznova vraćaju na svoje polazište?

fluktuacijama, dok je prostorvrijeme sasvim određeno i klasično. Slika je ovdje manje potpuna, ali barem imamo neku zamisao o tome kako nastaviti.

I na kraju, tu je potpuna kvantna teorija gravitacije, ma što ona bila. U ovoj teoriji, u kojoj su ne samo materija nego i samo vrijeme i sam prostor neodređeni i fluktuirajući, nije čak jasno ni to kako postaviti pitanje je li putovanje kroz vrijeme moguće. Možda bi najbolje bilo zapitati kako bi ljudi u područjima u kojima je prostorvrijeme gotovo klasično i oslobođeno neodređenosti tumačili svoja mjerenja. Bi li smatrali da se vremensko putovanje zbilo u područjima snažne gravitacije i velikih kvantnih fluktuacija?

Počnimo od klasične teorije: ravno prostorvrijeme specijalne teorije relativnosti (relativnosti bez gravitacije) ne dopušta putovanje kroz vrijeme. Jednako tako ne dopuštaju ga ni prva zakrivljena prostorvremena s kakvima su se fizičari bavili nakon objavljivanja Einsteinove teorije. Stoga je za Einsteina bilo veliko iznenađenje kad je 1949. Kurt Godel (autor teorema prikazanog u okviru) otkrio prostorvrijeme koje je bilo neki svemir pun rotirajuće materije, s vremenskim petljama u svakoj točki (il. 5.4).

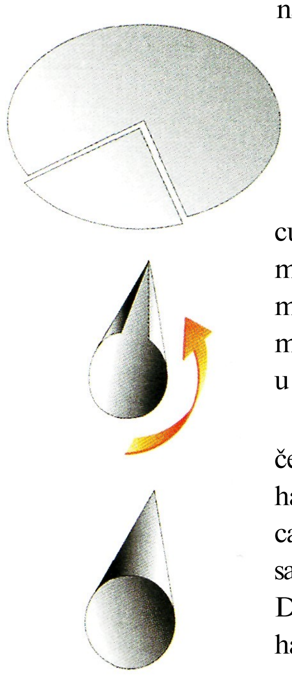
GODELOVA TEOREM NEPOTPUNOSTI

Matematičar Kurt Godel dokazao je 1931. svoj slavni teorem nepotpunosti o prirodi matematike. Taj teorem izriče da u okviru bilo kojeg formalnog sustava aksioma, kao što je to sadašnja matematika, uvijek postoje pitanja koja se ne mogu ni dokazati ni opovrgnuti na temelju aksioma koji određuju sustav. Drugim riječima, Godel je pokazao da postoje problemi koji se ne mogu riješiti nikakvim skupom pravila ili postupaka.

Godelov teorem postavio je temeljna ograničenja na matematiku. Bio je to veliki udarac za znanstvenu javnost, budući da je time potkopano rasprostranjeno uvjerenje da je matematika koherentan i potpun sustav postavljen na jedinstvenom logičkom temelju. Godelov teorem, Heisenbergovo načelo neodređenosti i praktična nemogućnost praćenja razvoja čak i jednog determinističkog sustava koji postaje kaotičan, bili su jezgra skupa ograničenja koja se postavljaju pred znanstvenu spoznaju i za koja se doznalo tek u dvadesetom stoljeću.

Godelovo rješenje zahtijevalo je kozmološku konstantu različitu od nule. Ta konstanta možda postoji, a možda i ne postoji u prirodi, ali kasnije su nađena i rješenja vremenskih petlji bez nje. Posebno zanimljiv slučaj je onaj u kome se dvije kozmičke strune mimoilaze pri velikim brzinama.

Kozmičke strune ne bi trebalo pobrkati s onima iz teorije struna, premda one nisu potpuno međusobno nepovezane. Riječ je o objektima s dužinom, ali sasvim sićušnim poprečnim presjekom. Njihovo postojanje predviđeno je u nekim teorijama elementarnih čestica. Prostorvrijeme izvan jedne pojedinačne kozmičke strune je ravno. Riječ je, međutim, o ravnom prostorvremenu iz kojeg je isječen jedan odsječak u obliku klina. Stvar je slična stošcu: isijecite iz velikog okruglog komada papira jedan dio sličan komadu torte, kružni isječak čiji je vršni kut u središtu kruga. Zatim maknete taj isječeni dio i zalijepite rubove preostalog okruglog komada papira tako da dobijete stožac. On predstavlja prostorvrijeme u kojem postoji kozmička struna (il. *5.5).*

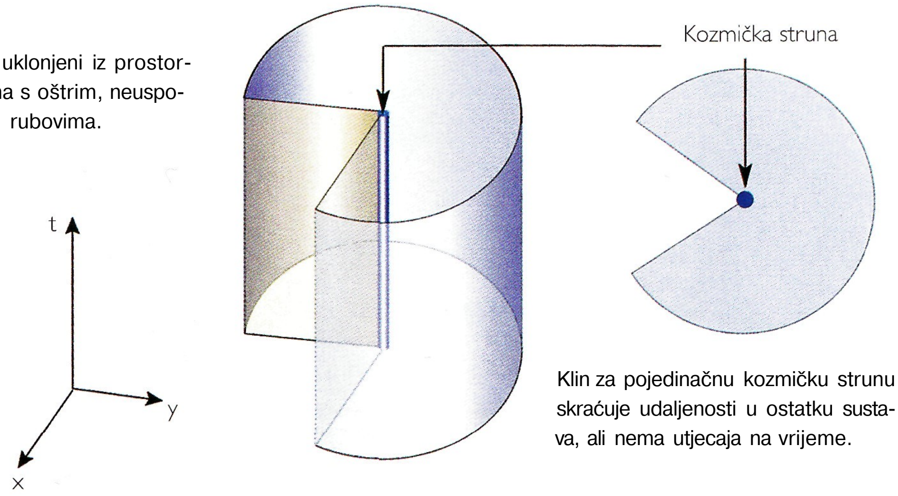


il5.5

Budući da je površina stošca isti ravni list papira od kojeg ste počeli (minus isječak), i dalje je možete zvati "ravnom", s izuzetkom vrha. Zakrivljenost kod vrha može se prepoznati po činjenici da kružnica opisana oko vrha ima sad manji opseg od kružnice koja bi bila opisana na istoj udaljenosti oko središta prvobitnog okruglog lista papira. Drugim riječima, zbog nedostajućeg dijela (isječka), kružnica oko vrha kraća je nego kružnica istog polumjera u ravnom prostoru (il. *5.6).*

Slično tome, kod kozmičkih struna, klin koji je uklonjen iz ravnog prostorvremena skraćuje kružnice oko struna, ali ne utječe na vrijeme ili udaljenosti duž struna. To znači da prostorvrijeme oko pojedinačne kozmičke strune ne sadrži nikakve vremenske petlje, tako da nije moguće putovati u prošlost. Međutim, ako je tu još jedna kozmička struna koja se kreće u odnosu na prvu, njen vremenski pravac bit će kombinacija vremenskih i prostornih pravaca prve. To znači da će klin koji je isječen iz druge strune skratiti i udaljenosti u prostoru i vremenske intervale kako ih vidi netko tko se kreće s prvom strunom (il. *5.7).* Ako se dvije kozmičke strune kreću približno brzinom svjetlosti jedna u odnosu na drugu, ušteda vremena pri putovanju oko obje strune može biti toliko velika da se može stići natrag prije nego što se uopće krenulo. Ovdje, znači, postoje vremenske petlje po kojima se može vratiti u prošlost.

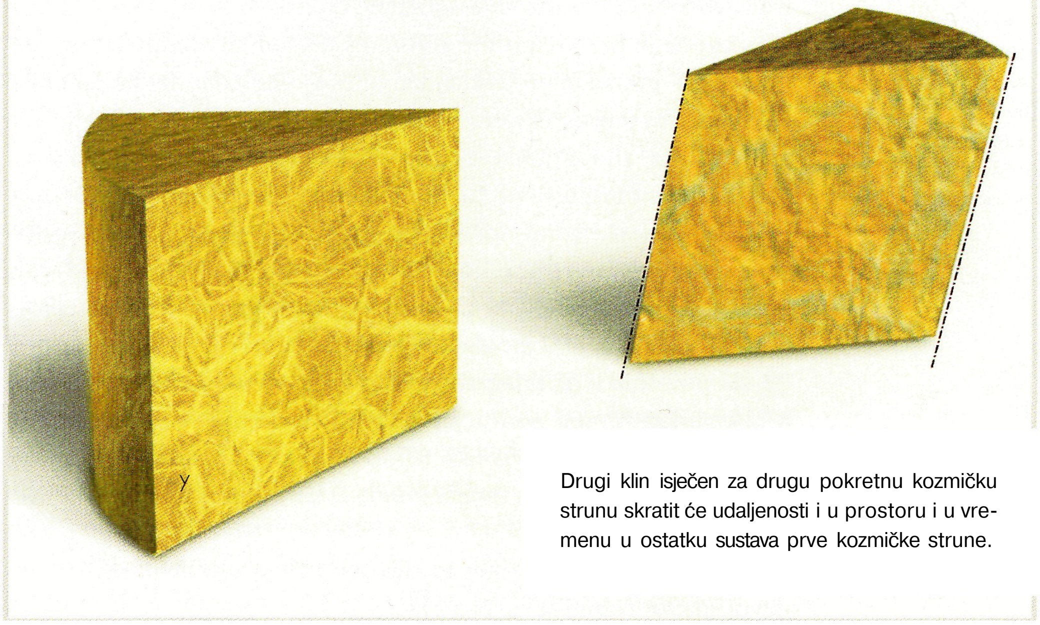
IL. 5.6



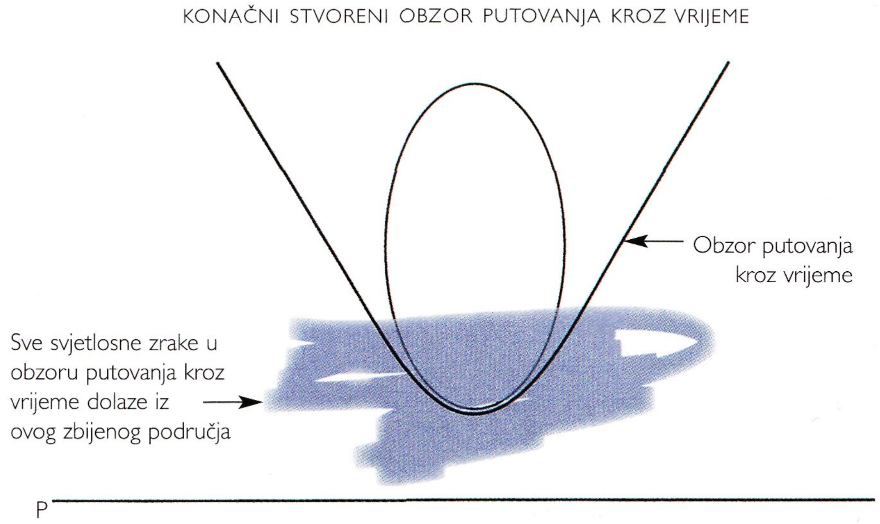
Klinovi uklonjeni iz prostor-vremena s oštrim, neusporednim rubovima.

Klin za pojedinačnu kozmičku strunu skraćuje udaljenosti u ostatku sustava, ali nema utjecaja na vrijeme.

IL. 5.7



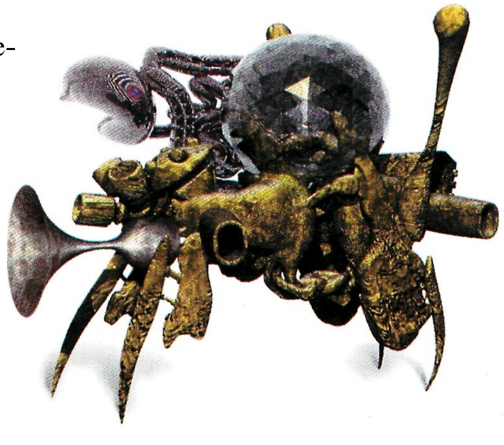
Drugi klin isječen za drugu pokretnu kozmičku strunu skratit će udaljenosti i u prostoru i u vremenu u ostatku sustava prve kozmičke strune.



(IL 5.8)
Čak i najrazvijenija civilizacija može zakriviti prostorvrijeme samo u nekom konačnom području. Obzor putovanja kroz vrijeme, granicu dijela prostorvremena u kojem je moguće vratiti se u vlastitu prošlost, stvaraju svjetlosne zrake koje potječu iz konačnih područja.

Prostorvrijeme kozmičkih struna sadrži tvar koja ima pozitivnu energetsku gustoću i svojstva suglasna s nama poznatim fizikalnim zakonima. Međutim, savijanje koje proizvodi vremenska petlja proteže se sve do beskonačnosti u prostoru, odnosno sve do beskonačne prošlosti u vremenu. U tim prostorvremenima bile su mogućnosti vremenskih putovanja ugrađene od početka. Nemamo razloga smatrati da je naš svemir bio stvoren s takvom savijenošću, niti raspolažemo pouzdanim dokazima o posjetiteljima iz budućnosti. (Odbacujem teoriju zavjere po kojoj NLO potječu iz budućnosti, a vlada to zna, ali taji. Ona se, naime, nije baš pokazala spretna u čuvanju tajni.) Pretpostavit ću stoga da nije bilo vremenskih petlji u dalekoj prošlosti, odnosno, točnije govoreći, u prošlosti jedne površine kroz prostorvrijeme koju ću nazvati P. Pitanje u tom slučaju glasi: je li neka razvijena civilizacija mogla napraviti vremeplov? Drugim riječima, je li mogla preinačiti prostorvrijeme budućnosti P (iznad površine P na dijagramu) tako da se vremenske petlje pojave u nekom konačnom području? Kažem u nekom konačnom području, jer bez obzira na to koliko ta hipotetska civilizacija postane razvijena, ona bi po svemu sudeći mogla kontrolirati samo neki konačni dio svemira.

U znanosti često ključ za rješenje nekog problema leži u njegovoj pravoj formulaciji. Naš slučaj je dobar primjer za to. Da bih



razjasnio što podrazumijevam pod konačnim vremeplovom, vratit ću se jednom svom ranijem radu. Putovanje kroz vrijeme moguće je u nekom području prostorvremena u kojem postoje vremenske petlje, staze po kojima se predmeti koji se gibaju sporije od svjetlosti, mogu, zahvaljujući prostorvremenskoj zakrivljenosti, vratiti u mjesto s kojeg su i u vrijeme kada su krenuli. Budući da sam pošao od pretpostavke da u dalekoj prošlosti nije bilo vremenskih petlji, mora postojati nešto što bih mogao nazvati "obzor vremenskog putovanja", granica koja razdvaja područje vremenskih petlji od područja bez njih (il. 5.8).

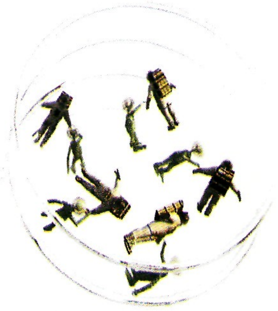
Pitanje je dakle-, je li neka razvijena civilizacija mogla sagraditi vremeplov?

Obzor vremenskog putovanja ima sličnosti s obzorom crnih jama. Dok obzor crne jame stvaraju svjetlosne zrake kojima je tek samo malo nedostajalo da upadnu u nju, obzor vremenskog putovanja grade svjetlosne zrake koje se, slijedeći vremensku petlju, zamalo nisu srele sa samima sobom. Jednom vremeplovu odgovara ono što ja zovem ograničeno stvoreni obzor. Taj se obzor sastoji od svjetlosnih zraka koje sve dolaze iz nekog ograničenog prostora konačne veličine. Drugim riječima, one ne dolaze iz beskonačnosti ili iz singularnosti već iz nekog konačnog područja, one vrste područja za kakvo želimo znati može li ga proizvesti izmišljena razvijena civilizacija.

Prihvativši ovu definiciju kao plan vremeplova, možemo upotrijebiti matematičke alate koje smo Roger Penrose i ja razradili pri proučavanju singularnosti i crne jame. Čak i bez primjene Einsteinovih jednadžbi, mogu pokazati da će, uopćeno govoreći, neki ograničeno stvoreni obzor sadržavati jednu svjetlosnu zraku koja se doista susreće sama sa sobom — odnosno, svjetlosnu zraku koja se neprekidno vraća u istu točku. Svaki put kada se svjetlost vrati, ona ima sve veći i veći plavi pomak pa će tako slike postajati sve plavije i plavije. Vrhovi valova sabijaju se sve gušće zajedno, a svjetlost prelazi petlju u sve kraćim intervalima svoga vremena. U stvari, jedna takva čestica svjet-

losti imala bi mjereno njenom mjerom vremena, samo jednu konačnu povijest, iako se vrtila u krug u nekom konačnom prostoru i nije udarala u neku zakrivljenu singularnost.

Čovjek bi mogao i ne mariti dovršava li neka čestica svjetlosti svoju povijest u konačnom vremenu. Ali mogu dokazati da će ista sudbina snaći i objekte koji se gibaju brzinama manjima od svjetlosne. Bile bi to povijesti promatrača koji bi bili zarobljeni u nekom konačnom području prije obzora i koji bi se vrtjeli u krug sve brže i brže, sve dok ne bi nakon nekog konačnog vremena postigli brzinu svjetlosti. Ako vas, dakle, neka zgodna izvanzemaljka iz letećeg tanjura pozove u svoj vremeplov, budite oprezni. Može vam se dogoditi da se nađete u klopci neke od tih ponavljajućih povijesti konačnog trajanja (il. 5.9).



(I l 5.9, gore) Opasnost putovanja kroz vrijeme.

(IL. 5.10, strana 145) Iz predviđanja da crne jame zrače i gube masu proizlazi da kvantna teorija uvjetuje pritjecanje negativne energije u crnu jamu preko obzora. Da bi se smanjila veličina crne jame, gustoća energije na obzoru mora biti negativna, a upravo to je nužno da bi se napravio vremeplov.

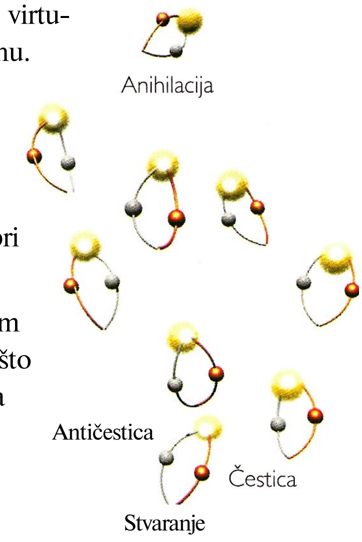
Ovi rezultati ne zavise od Einsteinovih jednadžbi već samo od načina na koji bi prostorvrijeme trebalo biti savijeno da bi proizvelo vremenske petlje u nekom konačnom području. Možemo, međutim, sada postaviti pitanje kakvu bi vrstu tvari neka razvijena civilizacija morala koristiti da tako savije prostorvrijeme da bi mogla napraviti vremeplov konačne veličine. Može li ta tvar imati svugdje pozitivnu energetsku gustoću, kao u prostorvremenu kozmičkih struna kakvog sam prethodno opisao? Prostorvrijeme kozmičkih struna nije zadovoljilo moj zahtjev da se vremenske petlje pojave u konačnom području. No, moglo bi se pomisliti da je to samo stoga što su kozmičke strune beskonačno dugačke. Može se zamisliti da bi bilo moguće napraviti konačni vremeplov korištenjem konačnih petlji kozmičkih struna i istodobno imati svuda pozitivnu energetsku gustoću. Šteta je razočarati ljude poput Kipa, koji se žele vratiti u prošlost, ali to se ipak ne može učiniti ako svugdje postoji pozitivna energetska gustoća. Mogu dokazati da je za izgradnju konačnog vremeplova neophodna negativna energija.

Energetska gustoća uvijek je pozitivna u klasičnoj teoriji, tako da su vremeplovi konačne veličine isključeni na toj razini. Okolnosti su, međutim, drukčije u poluklasičnoj teoriji, gdje se pretpostavlja da se materija ponaša suglasno kvantnoj teoriji, dok je prostorvrijeme sasvim određeno i klasično. Kao što smo vidjeli, načelo neodređenosti kvantne teorije podrazumijeva da polja uvijek fluktuiraju čak i u prividno praznom prostoru i imaju energetsku gustoću koja je

beskonačna. Mora se, dakle, oduzeti neka beskonačna veličina da bi se dobila konačna energetska gustoća koju zapažamo u svemiru. Nakon ovog oduzimanja može se dobiti negativna energetska gustoća, barem u lokalnim razmjerima. Čak se i u ravnom prostoru mogu naći kvantna stanja kod kojih je energetska gustoća lokalno negativna, iako je ukupna energija pozitivna. Može se postaviti pitanje izazivaju li ove negativne vrijednosti takvo savijanje prostorvremena koje bi dalo konačan vremeplov, ali čini se da moraju. Kao što smo vidjeli u četvrtom poglavlju, kvantne fluktuacije čine to da je čak i prividno prazan prostor pun parova virtualnih čestica koje se zajedno pojavljuju, zatim razdvajaju, a onda ponovo spajaju i međusobno poništavaju (il. 5.10). Jedan član para virtualnih čestica imat će pozitivnu energiju, a drugi negativnu. Kad je u blizini crna jama, član s negativnom energijom može upasti u nju, dok onaj drugi može otići u beskonačnost, gdje izgleda kao zračenje koje odnosi pozitivnu energiju iz crne jame. Cestica s negativnom energijom izaziva gubitak mase crne jame i njeno lagano isparavanje, pri čemu joj se obzor smanjuje (il. 5.11)

IL.5.11

IL. 5.10



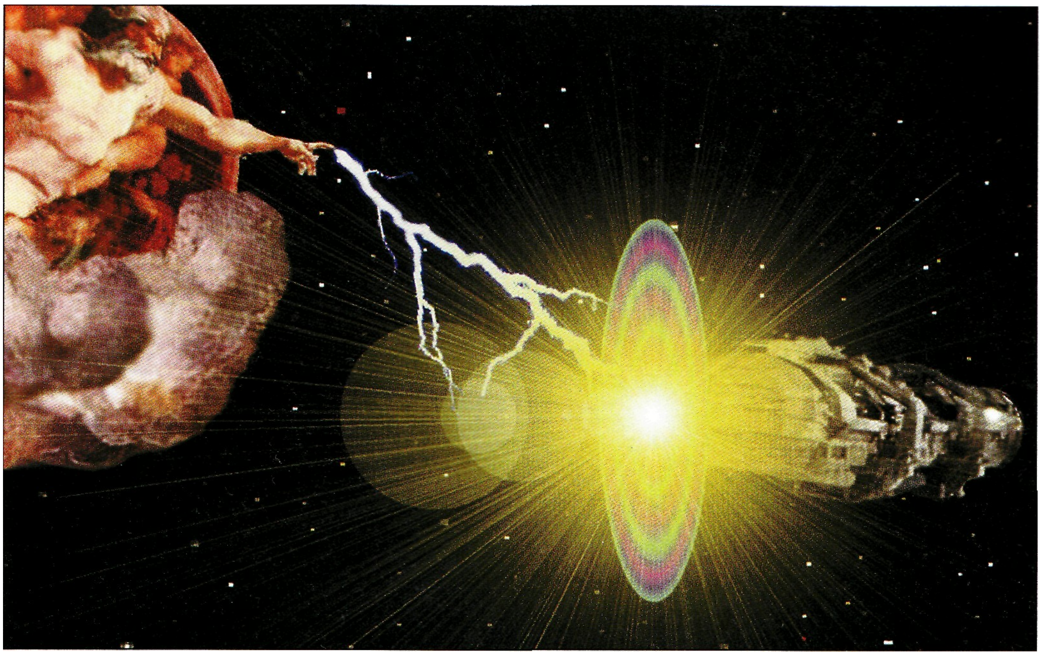
Obična materija s pozitivnom energetskom gustoćom ima privlačni gravitacijski učinak i savija prostorvrijeme, što izaziva skretanje svjetlosnih valova jednih prema drugima — baš kao što lopta na gumenoj elastičnoj plahti, spomenuta u poglavlju 2, uvijek izobliči gumu tako da se malene lopte gibaju prema njoj, a nikad ne od nje.

Moj unuk, William Mackenzie Smith.

Iz toga bi slijedilo da se područje obzora crne jame može remenom samo povećavati, a nikada smanjivati. Da bi se obzor neke crne jame smanjio, njegova energetska gustoća morala bi biti negativna te tako savinuti prostorvrijeme da prisili svjetlosne zrake da se međusobno razilaze. To sam prvi put shvatio kad sam jednom odlazio na počinak ubrzo nakon rođenja moje kćeri. Ne želim reći prije koliko je godina to bilo; reći ću samo da sada imam unuka.

Isparavanje crnih jama pokazuje da na kvantnoj razini energetska gustoća može ponekad biti negativna i savinuti prostorvrijeme u smjeru koji je neophodan za izradu vremeplova. Možemo stoga zamisliti da bi neka vrlo razvijena civilizacija mogla proizvesti negativnu gustoću energije koja bi bila dovoljna za gradnju vremeplova za makroskopske predmete kakvi su pravi svemirski brodovi. Postoji, međutim, jedna značajna razlika između obzora crne jame, određenog svjetlosnim zrakama koji su za dlaku uspjeli pobjeći, i obzora vremeplova koji sadrži zatvorene svjetlosne zrake koje se neprekidno vrte u krug. Neka virtualna čestica koja se kreće takvom zatvorenom stazom donosila bi stalno iznova svoju energiju osnovnog stanja u istu točku. Očekivalo bi se stoga da gustoća energije bude beskonačna na obzoru — na granici vremeplova, području u kome se može putovati u prošlost. Ovo proizlazi iz točnih proračuna vezanih za nekoliko slučajeva koji su dovoljno jednostavni da se proračuni obave. To znači da bi neka osoba ili svemirska sonda, koja bi pokušala prijeći preko obzora i ući u vremeplov, bila zbrisana bljeskom zračenja (il. 5.12). Budućnost, dakle, izgleda crna za putovanje kroz vrijeme — ili bi možda prikladnije bilo reći: zasljepljujuće bijela?

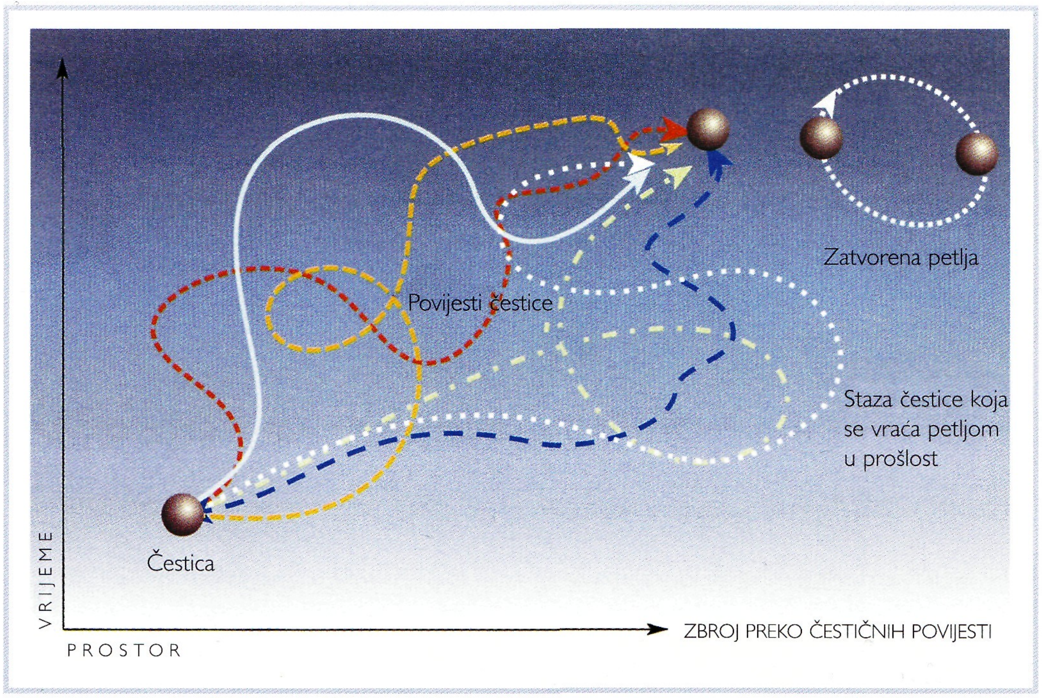
Energetska gustoća tvari zavisi od stanja u kakvom se ona nalazi, tako da nije isključeno da bi neka razvijena civilizacija bila u stanju osigurati konačnu energetsku gustoću na granici vremeplova "zamrzavanjem" ili uklanjanjem virtualnih čestica koje se stalno vrte u zatvorenoj petlji. Nije jasno, međutim, bi li takav vremeplov bio postojan: i najmanji poremećaj, poput onoga kada bi netko pokušao



(IL.5.12)
Onoga tko bi pokušao prijeći obzor putovanja kroz vrijeme mogao bi uništiti bljesak zračenja.

prijeći preko obzora da stupi u vremeplov, mogao bi ponovo pokrenuti u krug virtualne čestice i time izazvati udar munje. O ovom pitanju bi fizičari trebali raspravljati bez opasnosti da budu ismijani. Čak i ako se ustanovi da je putovanje kroz vrijeme nemoguće, važno je razumjeti zašto je nemoguće.

Da bi se do kraja odgovorilo na ovo pitanje, treba razmotriti kvantne fluktuacije ne samo polja materije nego i samog prostorvremena. Moglo bi se očekivati da to uzrokuje izvjesnu nejasnoću u stazama svjetlosnih zraka te cijelog pojma vremenskog slijeda. Dosta, za zračenje iz crnih jama možemo reći da istječe iz njih zato što zbog kvantnih fluktuacija prostorvremena obzor nije sasvim točno određen. Budući da još ne raspolažemo potpunom teorijom kvantne gravitacije, teško je reći kakva bi trebala biti djelovanja fluktuacija prostorvremena. No, možemo se nadati nekim pokazateljima na temelju Feynmanovog zbroja po povijestima, odnosno po prikazima povijesti, opisanog u poglavlju 3.

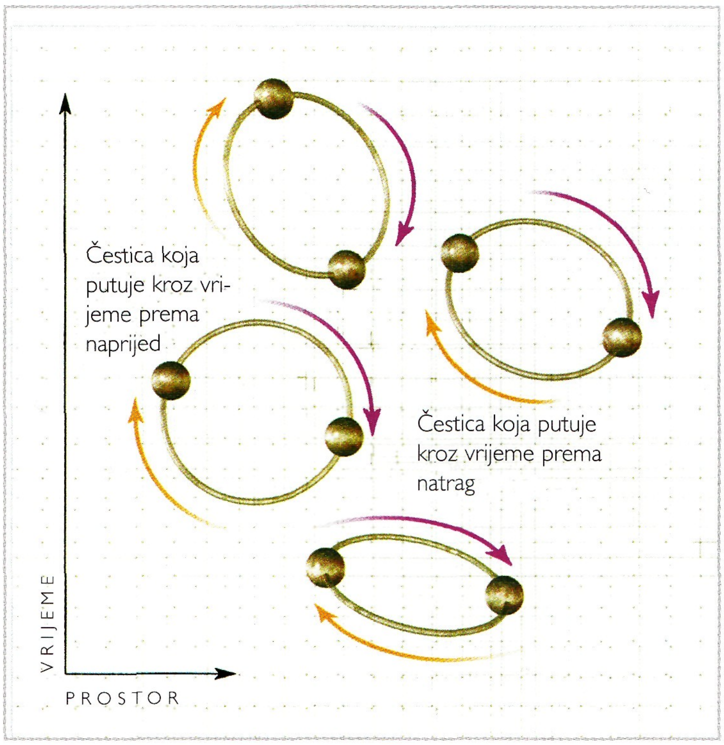


(IL.5.13)
Feynmanov zbroj preko svih prikaza povijesti obuhvaća i povijesti u kojima se čestice vraćaju u prošlost, pa čak i povijesti koji su zatvorene petlje u prostoru i vremenu.

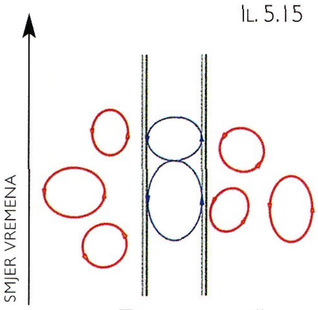
Svaka povijest je u našem slučaju zakrivljeno prostorvrijeme s poljima materije u sebi. Budući da moramo zbrojiti sve moguće povijesti, a ne samo one koje zadovoljavaju određene jednadžbe, zbroj mora obuhvatiti i prostorvremena koja su dovoljno savijena za putovanje u prošlost (il. 5.13). Pitanje, dakle, glasi: zašto se putovanja u prošlost ne događaju stalno? Odgovor je da se ona doista i odigravaju u mikroskopskim razmjerima, ali ih mi ne zapažamo. Ako se primjeni Feynmanova zamisao o zbroju po povijestima na jednu česticu, onda se moraju uzeti u obzir i povijesti u kojima ta čestica putuje brže od svjetlosti, pa čak i unatrag kroz vrijeme. Bit će uz to i takvih povijesti u kojima će se čestica vrtjeti u zatvorenoj petlji u vremenu i prostoru. Bilo bi to slično filmu *Beskonačni dan,* u kojem jedan televizijski izvjestitelj proživljava stalno iznova isti dan (il. 5.14).

Cestice s povijestima zatvorenih petlji ne mogu se izravno promatrati pomoću detektora čestica. No, njihovi neizravni učinci izmjereni su u brojnim pokusima. Jedan od njih je mali pomak svjetlosti koji se javlja kod vodikovih atoma, izazvan elektronima što se

IL. 5.14



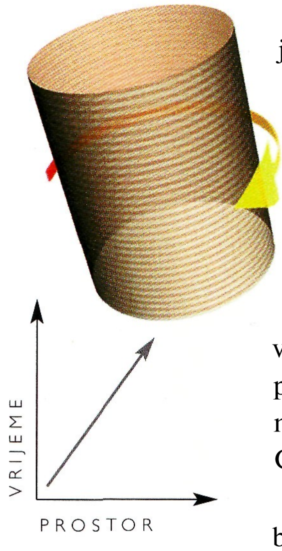
IL. 5.15



Zatvorene petlje

kreću u zatvorenim petljama. Drugi je mala sila između usporednih metalnih ploča, izazvana činjenicom da tu unutra, u usporedbi s vanjskim područjem, stane manje povijesti zatvorenih petlji — još jedna istovrsna interpretacija Casimirovog učinka. Prema tome, postojanje povijesti zatvorenih petlji potvrđeno je pokusima (il. 5.15).

Moglo bi se dovesti u sumnju postojanje veze između povijesti čestica zatvorenih petlji i savijenosti prostorvremena, zato što se one javljaju i spram nepromjenljive pozadine kakvo je ravno prostorvrijeme. Ali posljednjih smo godina ustanovili da pojave u fizici često imaju dva podjednako valjana opisa. Potpuno je, naime, isto reći da se neka čestica kreće zatvorenom petljom spram zadane nepromjenjive pozadine kao i da čestica ostaje nepomična, dok prostor i vrijeme fluktuiraju oko nje. Sve zavisi od toga izračunavate li prvo zbroj preko staza čestica, a onda zbroj preko zakrivljenih prostorvremena ili obratno.



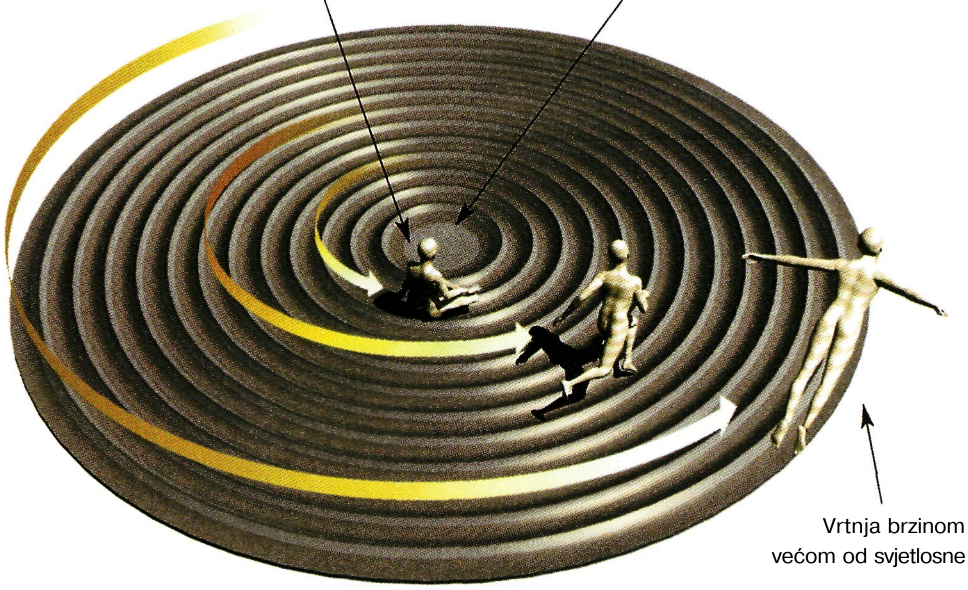
(IL 5.16)
Einsteinov svemir sličan je valjku: konačan je u prostoru i stalan u vremenu. Zbog svoje konačne veličine, može se svugdje vrtjeti brzinom manjom od svjetlosne.

Izgleda, dakle, da kvantna teorija dopušta putovanje kroz vrijeme u mikroskopskim razmjerima. To, međutim, nije od velike koristi za znanstveno-fantastične priče, kao što je vraćanje u prošlost i ubojstvo vlastitog djeda. Pitanje stoga glasi: može li vjerojatnost u zbroju preko povijesti kod prostorvremena s makroskopskim vremenskim petljama imati maksimum?

Ovo pitanje može se razmotriti proučavanjem zbroja preko povijesti polja materije u nizu pozadinskih prostorvremena koja dolaze sve bliže i bliže dopuštajući vremenske petlje. Očekivalo bi se da se dogodi nešto dramatično kada se vremenske petlje prvi put jave. To se doista i pokazalo na jednom jednostavnom primjeru što sam ga istražio zajedno s mojim doktorandom Michaelom Cassidyjem.

Pozadinska prostorvremena u nizu, koja smo mi proučavali, u bliskoj su svezi s onim što se naziva Einsteinov svemir: prostorvrijeme koje je Einstein bio predložio onda kada je smatrao da je svemir statičan i da se ne mijenja vremenom, ne šireći se niti stežući (vidjeti poglavlje 1). U Einsteinovom svemiru vrijeme teče iz beskonačne prošlosti u beskonačnu budućnost. Pravci prostora su, međutim, konačni i zatvaraju se u same sebe, poput površine Zemlje, ali s jednom dimenzijom više. Ovo prostorvrijeme može se zamisliti kao valjak čija je duža os vremenski pravac, a poprečni presjek su tri prostorna pravca (il. 5.16).

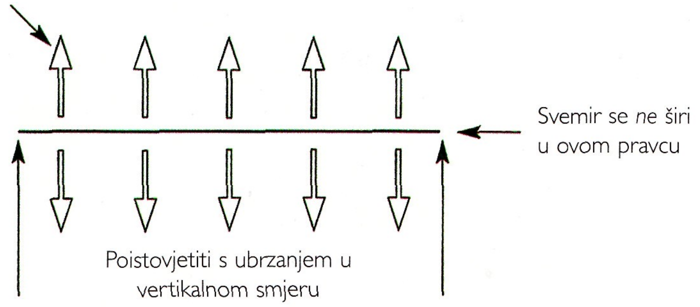
Einsteinov svemir nije svemir u kojem mi živimo, jer se ne širi. Pa ipak, on je zgodna pozadina koja se može upotrijebiti pri razmatranju putovanja kroz vrijeme zato što je jednostavan za jasno izračunavanje zbroja po povijestima. Ostavimo na trenutak po strani putovanje kroz vrijeme i razmotrimo stvar u Einsteinovom svemiru koji se okreće oko neke osi. Ako ste na osi, mogli biste ostati u istoj točki prostora, kao da stojite u središtu kakvog vrtuljka. Ali ako niste na osi, kretali biste se kroz prostor, vrteći se oko nje. Što ste dalje od osi, to biste se brže vrtjeli (il. 5.17). Ako bi, dakle, svemir bio prostorno beskonačan, točke dovoljno udaljene od osi morale bi se vrtjeti brzinom većom od svjetlosne. Kako je, međutim, Einsteinov svemir konačan u prostornim pravcima, postoji kritična brzina vrtnje ispod koje nijedan dio svemira ne rotira brže od svjetlosti.



(iL5.I7)
U ravnom prostoru vrtnja krutog tijela odvijat će se brzinom većom od svjetlosne na većim udaljenostima od osi.

Razmotrimo sada zbroj preko povijesti čestica u rotirajućem Einsteinovom svemiru. Kada je vrtnja spora, ima mnogo staza po kojima čestica može ići s danom joj količinom energije. Prema tome, zbroj preko svih povijesti čestica spram ove pozadine daje veću amplitudu. To znači da bi vjerojatnost ove pozadine bila visoka u zbroju preko svih povijesti zakrivljenog prostorvremena, odnosno ono spada u vjerojatnije povijesti. Kako se, međutim, brzina rotiranja Einsteinovog svemira približava kritičnoj vrijednosti, tako da se njegovi vanjski rubovi kreću brzinom koja se primiče svjetlosnoj, postoji samo jedna staza čestice koja je klasično dopuštena na rubu — ona, naime, koja se kreće brzinom svjetlosti. Odavde slijedi da će zbroj preko povijesti čestica biti malen. Prema tome, vjerojatnost ovih pozadina bit će niska u zbroju preko svih zakrivljenih prostorvremenskih povijesti. Drugim riječima, one su najmanje vjerojatne.

(IL 5.18) POZADINA SA ZATVORENIM KRIVULJAMA VREMENSKOGA TIPA



Kakve veze imaju rotirajući Einsteinovi svemiri s putovanjem kroz vrijeme i vremenskim petljama? Odgovor glasi da oni predstavljaju matematičke ekvivalente s drugim pozadinama koje dopuštaju vremenske petlje. Ove druge pozadine su svemiri koji se šire u dva prostorna pravca. Ti svemiri se ne šire u trećem prostornom pravcu koji je periodičan. To znači da ako prevalite neku udaljenost u tom pravcu, vratit ćete se na mjesto odakle ste pošli. Svaki put, međutim, kada napravite krug u trećem prostornom pravcu, vaša brzina u prvom ili drugom pravcu se povećava (il. 5.18).

Ako je ovo povećanje malo, nema vremenskih petlji. Razmotrimo, međutim, niz pozadina s velikim povećanjem brzine. Pri određenoj kritičnoj vrijednosti pojavit će se vremenske petlje. Nimalo iznenađujuće, ova kritična vrijednost odgovara kritičnoj brzini rotiranja Einsteinovog svemira. Kako su proračuni zbroja po povijestima za ove pozadine ma-

tematički ekvivalentni, može se zaključiti da vjerojatnost tih pozadina pada prema nuli kako se približavaju savijenosti neophodnoj za vremenske petlje. Drugim riječima, vjerojatnost zakrivljenosti dovoljne za vremeplov ravna je nuli. Ovo ide u prilog onome što sam nazvao "naslučivanje o zaštiti kronologije": zakoni fizike urotili su se da spriječe putovanje makroskopskih objekata kroz vrijeme.

Iako zbroj po povijestima dopušta vremenske petlje, njihova vjerojatnost je izuzetno mala. Na temelju gore spomenutog, procjenjujem da je vjerojatnost da se Kip Thorne vrati u prošlost i ubije svoga djeda manja od jedan prema broju koji iza jedinice ima niz od bilijun bilijuna bilijuna bilijuna bilijuna nula.

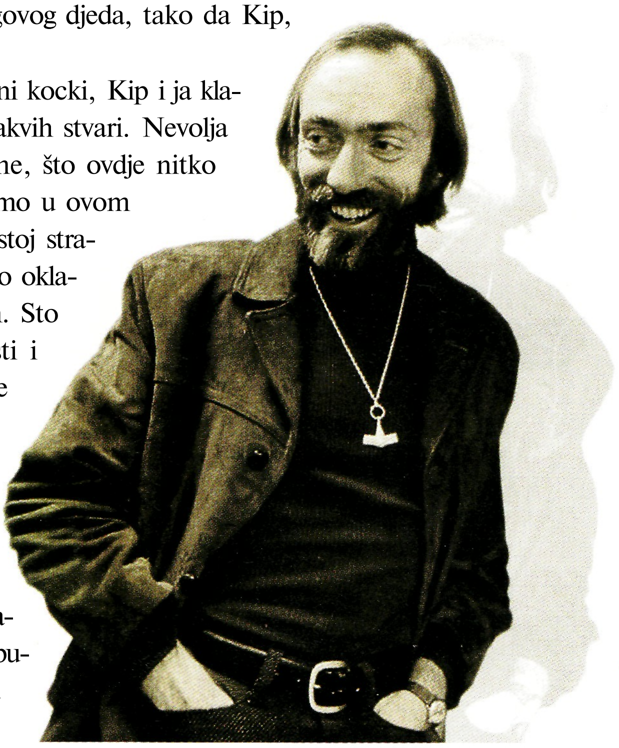
Vjerojatnost da se Kip vrati u prošlost i ubije svoga djeda iznosi

Drugim riječima, to je manje od i prema broju i iza kojeg slijedi bilijun bilijuna bilijuna bilijuna bilijuna nula.

Riječ je o zaista maloj vjerojatnosti, ali ako dobro pogledate Kipovu sliku, zapazit ćete blagu zamućenost po rubovima. To odgovara sićušnoj mogućnosti da se neki nitkov iz budućnosti vratio u prošlost i ubio njegovog djeda, tako da Kip, zapravo, i nije tu.

Kao ljudi skloni kocki, Kip i ja kladili smo se oko ovakvih stvari. Nevolja je, međutim, u tome, što ovdje nitko ne pobjeđuje, jer smo u ovom slučaju obojica na istoj strani. Ne bih prihvatio okladu ni s kim drugim. Sto ako je iz budućnosti i zna da je putovanje kroz vrijeme ostvarivo?

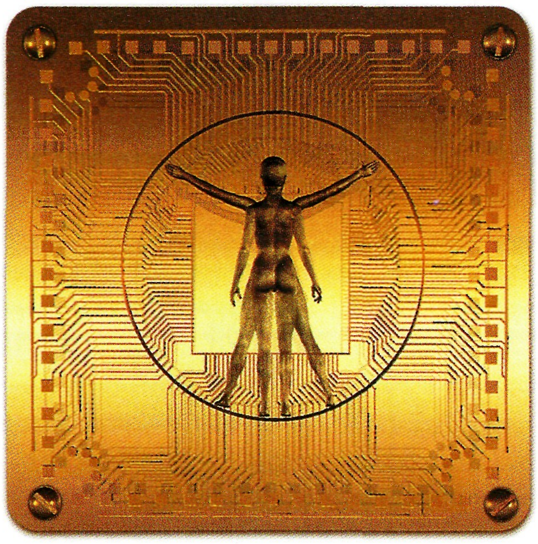
Možda ćete doći do zaključka da je ovo poglavlje dio vladinog plana zataškavanja istine o putovanju kroz vrijeme. Možda ste u pravu.



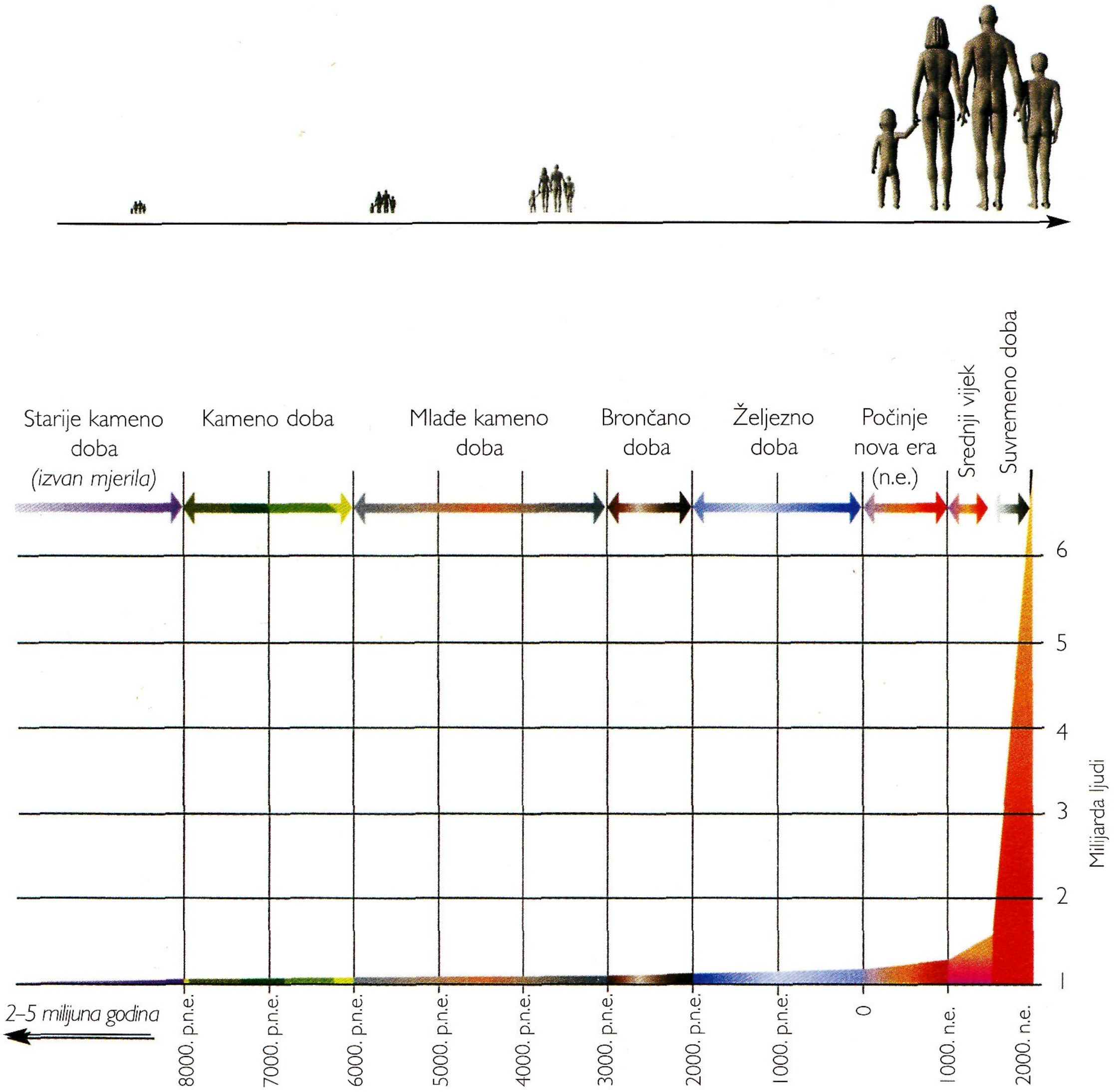
POGLAVLJE 6

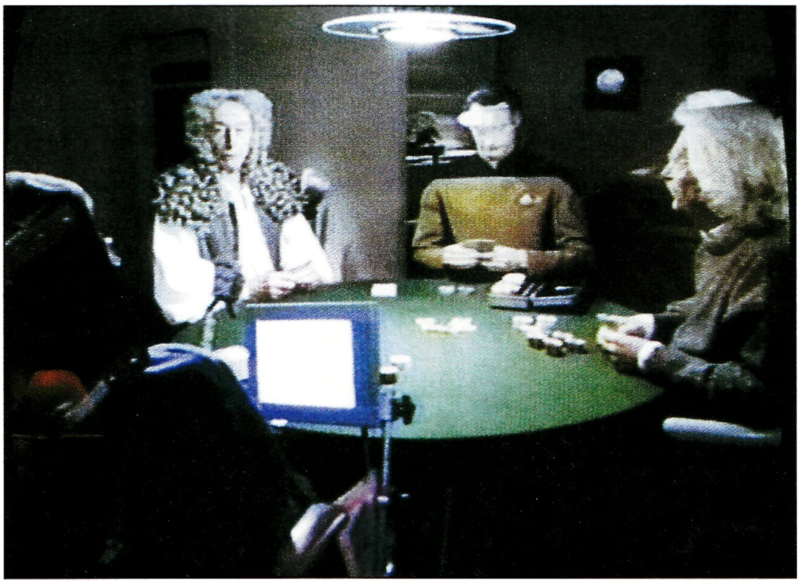
NAŠA BUDUĆNOST? *ZVJEZDANE STAZE* ILI NE?

Kako će se rastuća složenost biološkog i elektronskog života razvijati sve većom brzinom.



(IL. 6.1) POVEĆANJE POPULACIJE





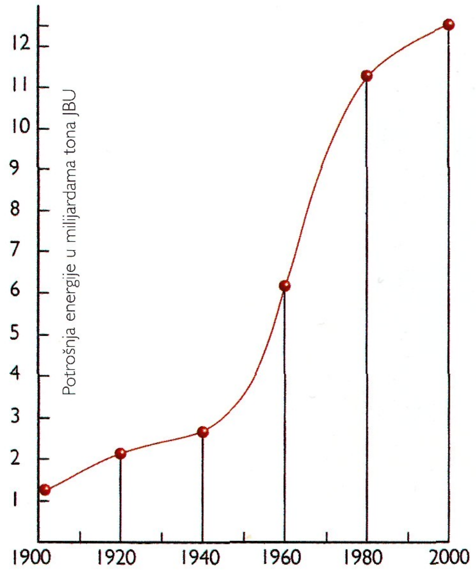
Newton, Einstein, zapovjednik Data i ja igramo poker u jednoj od scena iz Zvjezdanih staza.

Ljubaznošću Paramount Pictures.
ZVJEZDANE STAZE: SLJEDEĆA GENERACIJA
Copyright ©2001 by Paramount Pictures.
Ali Rights Reserved

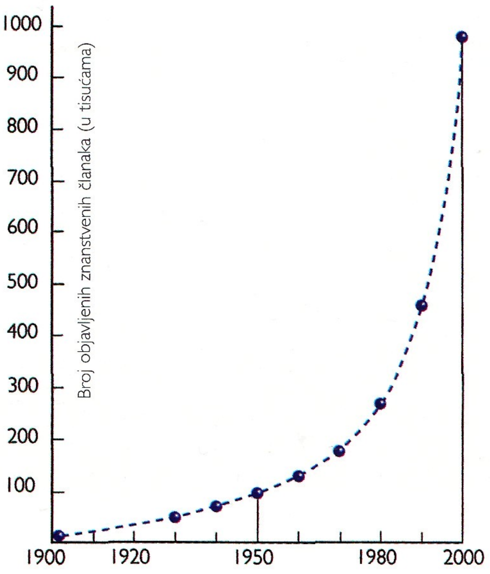
Z*VJEZDANE STAZE* ZAHVALJUJU SVOJU POPULARNOST ČINJENICI ŠTO nude viziju tako sigurne i utješne budućnosti. I sam sam pomalo poklonik ove TV serije, tako da nije bilo potrebno mnogo uvjeravanja pa da sudjelujem u jednoj epizodi u kojoj sam igrao poker s Newtonom, Einsteinom i zapovjednikom Dataom. Bio sam najbolji, ali nažalost oglašena je uzbuna pa sam ostao bez dobitka.

Zvjezdane staze prikazuju društvo daleko razvijenije od našeg glede znanosti i tehnologije te društvenog ustroja. (Ovo posljednje i nije tako teško.) Čini se da je bilo velikih promjena, uz prateće napetosti i nemire, između našeg i njihovog vremena, ali pokazuje se da su znanost, tehnologija i organizacija društva dostigle gotovo savršenu razinu.

Želim ovu sliku dovesti pod znak pitanja, jer muče me dvojbe hoćemo li ikada dostići konačno stalno stanje u znanosti i tehnologiji. Ni u jednom trenutku tijekom približno deset tisuća godina proteklih od posljednjega ledenog doba ljudska se rasa nije nalazila u stanju konačnog znanja i nepromjenjive tehnologije. Dogodila su se i izvjesna nazadovanja, kao što je bilo mračno doba nakon pada Rimskog carstva. Ali svjetska populacija, koja je mjera naše tehnološke sposobnosti da očuvamo vrstu i prehranimo se, na stalnoj je uzlaznoj krivulji, osim kratkotrajnih zastoja poput Crne smrti. (il. 6.1).



SVJETSKA POTROŠNJA STRUJE



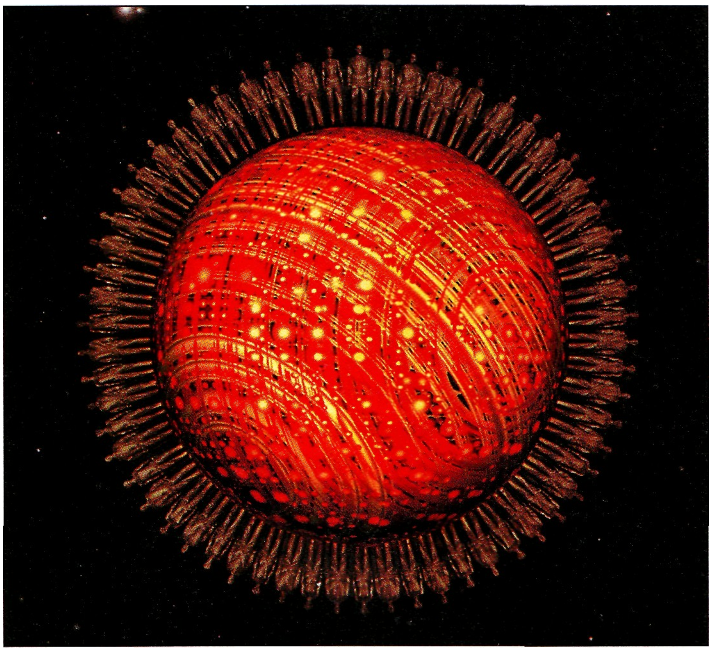
OBJAVLJIVANJE ZNANSTVENIH ČLANAKA U SVIJETU

(IL 6.2)
Lijevo: Ukupna svjetska potrošnja struje u milijardama tona JBU. Jedna tona -Jedinica bituminoznog ugljena = 8,13MWh.

Desno: Broj znanstvenih članaka objavljenih svake godine. Okomita os je u tisućama. Godine 1900. bilo ih je 9000; 1950. već 90.000, a 2000. čak 900.000 objavljenih članaka.

Tijekom posljednjih dvije stotine godina, populacijski rast postao je eksponencijalan — populacija se povećava za isti postotak svake godine. Taj rast trenutno iznosi 1,9 posto godišnje. To možda ne izgleda vrlo dramatično, ali zapravo znači da se pučanstvo našeg planeta udvostručuje svakih četrdeset godina (il. 6.2).

Drugi pokazatelji tehnološkog razvoja u novije vrijeme su potrošnja električne energije i broj objavljenih znanstvenih i stručnih radova. I na ova dva područja javlja se eksponencijalni rast, pri čemu je razdoblje udvostručenja kraće od četrdeset godina. Nema naznaka o tome da će se znanstveno-tehnički razvoj usporiti i zaustaviti u bliskoj budućnosti — a svakako ne do vremena *Zvjezdanih staza* koje se odigravaju u ne tako dalekoj budućnosti. Ali ako se populacijski rast i povećanje potrošnje električne energije nastave sadašnjim tempom, oko 2600. godine stanovnici svijeta stajat će zbijeni rame uz rame, a količina potrošene struje Zemlju će dovesti u stanje crvenog usijanja (v. il. na nasuprotnoj stranici).



Do 2600. godine stanovnici svijeta stajali bi stiješnjeni rame uz rame, a zbog potrošnje energije Zemlja bi sijala kao tijelo u stanju crvene usijanosti.

Ako biste stavljali sve novoobjavljene knjige jednu pokraj druge brzinom kojom se pojavljuju, morali biste juriti gotovo 150 kilometara na sat samo da biste hvatali kraj kolone. Dakako, u 2600. godini nova umjetnička i znanstvena djela bit će u elektronskom obliku, a ne više u obliku fizičkih knjiga ili radova na papiru. Pa ipak, ako se sadašnji eksponencijalni rast nastavi, pojavljivat će se deset radova u sekundi samo na mome području teorijske fizike, i nitko neće imati vremena da ih sve pročita.

Očito je dakle da se sadašnji eksponencijalni rast ne može nastaviti u nedogled. Ali što će se, onda, dogoditi? Jedna mogućnost je da sami sebe potpuno uništimo u nekoj kataklizmi kakva je nuklearni rat. Postoji jedna crna priča o tome da je razlog zašto izvanzemaljci nisu stupili u vezu s nama taj što civilizacije, kada dostignu otprilike našu razinu razvoja, postaju nepostojane i uništavaju same sebe. Ja sam, međutim, optimist. Ne vjerujem da je ljudska rasa stigla toliko daleko koliko je stigla da bi jednostavno zbrisala sebe baš sada kada stvari postaju stvarno zanimljive.

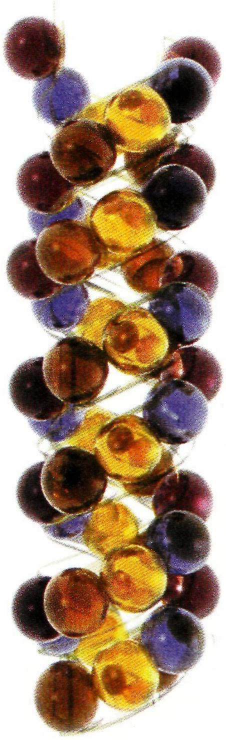
(Il. 6.3)
Priče u seriji *Zvjezdane staze* temelje se na sposobnosti broda *Enterprise,* a zvjezdani brodovi-vremeplovi poput ovog gore lijevo mogu se kretati brzinom mnogo većom od svjetlosne. No, ako je točna pretpostavka o zaštiti kronologije, Galaktiku ćemo morati istraživati svemirskim brodovima na raketni pogon koji se kreću sporije od svjetlosti.

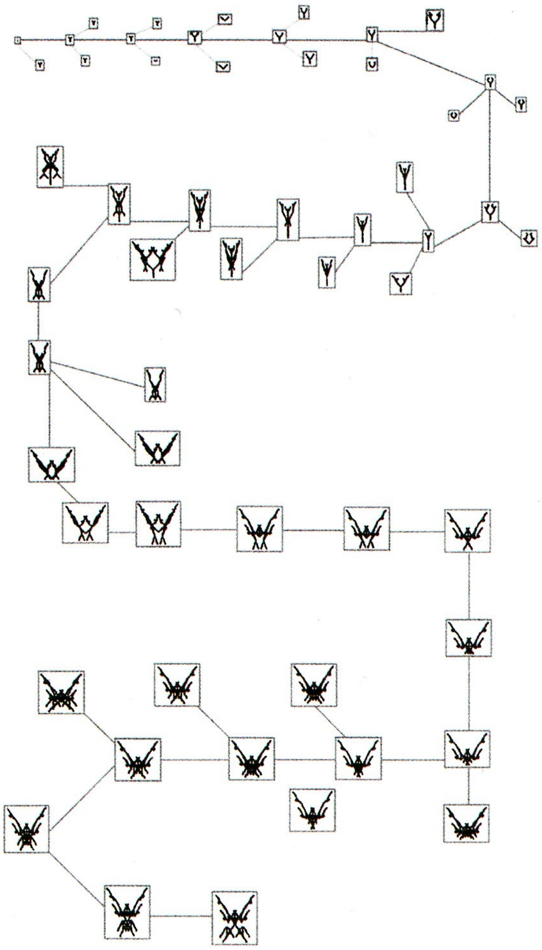
Viđenje budućnosti u *Zvjezdanim stazama* — a ta je da smo dostigli jednu visoku, ali u biti statičku razinu razvoja — moglo bi se obistiniti, barem što se tiče našeg znanja o temeljnim zakonima koji upravljaju svemirom. Kao što ću opisati u sljedećem poglavlju, možda postoji konačna teorija do koje ćemo doći u ne predalekoj budućnosti. O toj konačnoj teoriji, ako postoji, ovisi može li se ostvariti san iz *Zvjezdanih staza* o nadsvjetlosnom pogonu. Prema sadašnjem stanju stvari, morat ćemo Galaktiku istraživati na spor i mukotrpan način, pomoću svemirskih brodova koji putuju sporije od svjetlosti, no budući da još nemamo potpunu jedinstvenu teoriju, ne možemo ipak sasvim isključiti ni nadsvjetlosni pogon (il. 6.3).

S druge strane, poznamo već sada fizikalne zakone koji vrijede u svim stanjima osim u onim doista krajnjim: zakoni kojima se pokorava posada broda *Enterprise,* ako već ne i sam brod. No, kako izgleda, nikada nećemo dostići postojano stanje glede primjene tih zakona ili složenosti sustava što ih možemo proizvesti pomoću njih. Upravo pitanjem složenosti bavit ćemo se u preostalom dijelu ovog poglavlja.

Daleko najsloženiji sustav kojeg imamo su naša tijela. Život je, kako se čini, nastao u pradavnim oceanima koji su prekrivali Zemlju prije četiri milijarde godina. Nije nam poznato kako se to dogodilo. Moguće je da su slučajni sudari atoma doveli do nastanka makromolekula koje su se mogle umnožavati i okupljati u složenije sklopove. Ono što znamo je da se prije tri i po milijarde godina pojavila vrlo složena molekula, DNK molekula.

DNK je temelj sveukupnog života na Zemlji. Ona je po svojoj gradi poput dvostruke zavojnice, savijene kao pletenice, što su otkrili Francis Crick i James Watson u laboratoriju Cavendish na Cambridgeu 1953. Obje rubne niti ove dvostruke zavojnice povezane su međusobno parovima baza, pojedinačnim stubama na spiralnom stubištu. Četiri takve baze ugrađene su u DNK: adenin, gvanin, timin i citozin. Poredak u kome se one javljaju duž spiralnog stubišta šifrira genetske informacije koje omogućavaju DNK da sklapa organizam oko sebe i da se razmnožava. Prilikom pravljenja vlastitih kopija povremeno se događaju pogreške u opsegu ili poretku baza duž zavojnice. U većini slučajeva, zbog ovih pogrešaka pri kopiranju, DNK postaje nesposobna za umnožavanje ili ono postaje manje vjerojatno, što znači da se takve genetske pogreške ili mutacije, kako se nazivaju, neće prenijeti dalje. Ali u rijetkim slučajevima pogreška ili mutacija povećat će izglede da DNK opstane i razmnoži se. Takve promjene u genetskom kodu bit će povoljne. To je način na koji se informacije sadržane u lancu DNK postupno razvijaju, a složenost sve više povećava (v. il. 6.4, stranica 162).

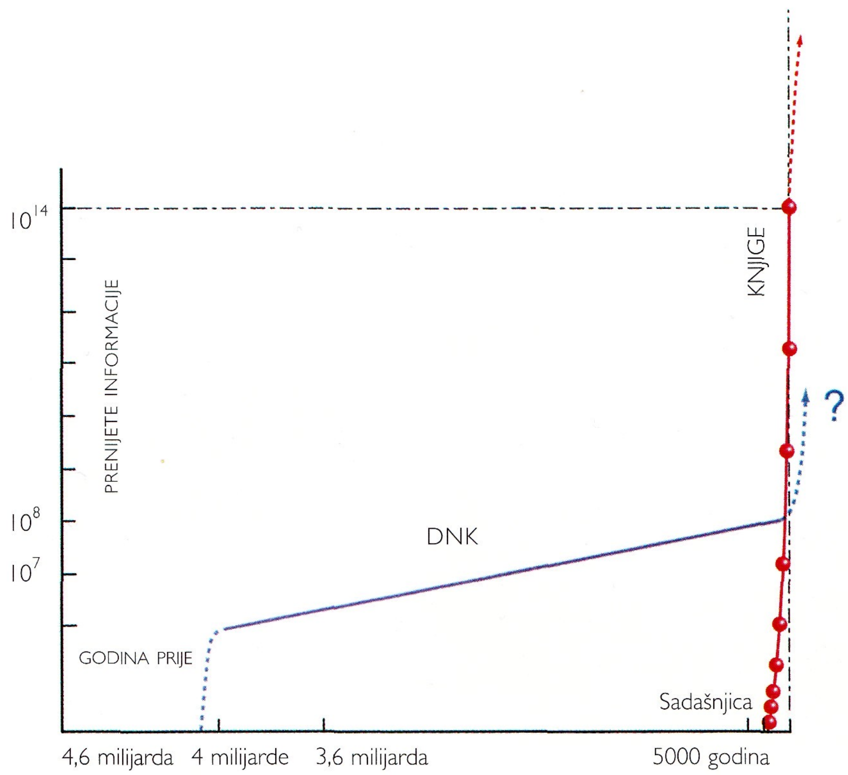




(IL 6.4) EVOLUCIJA NA DJELU

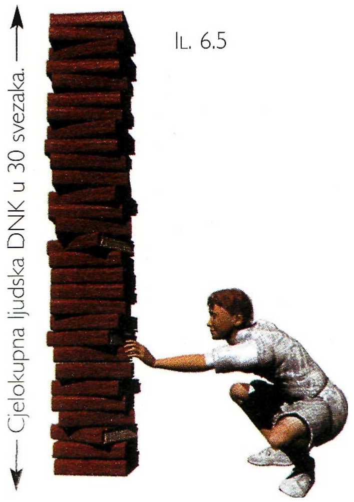
Desno su računalno napravljeni biomorfi koji su se razvili u programu što gaje osmislio biolog Richard Dawkins. Preživljavanje pojedinačnog soja zavisilo je od jednostavnih svojstava kao što su "zanimljivost","različitost" ili "kukcolikost".

Počevši od jednog piksela, prvo slučajno generiranje razvijalo se kroz postupak sličan prirodnom odabiranju. Dawkins je uzgojio kukcoliki oblik za samo 29 generacija (uz neki broj evolucijskih slijepih ulica).



Razvoj složenosti od nastanka Zemlje do danas. (nije u pravom mjerilu).

Budući da je biološki razvoj u biti slučajno lutanje u prostoru svih genetskih mogućnosti, on je bio vrlo spor. Složenost ili broj bita informacija koje su kodirane u DNK približno odgovara broju baza u molekuli. Tijekom otprilike prve dvije milijarde godina, tempo povećanja složenosti čini se da je bio reda veličine jednog bita informacija svakih stotinu godina. Brzina povećanja složenosti DNK zatim je postupno rasla na vrijednost od otprilike jednog bita godišnje, što je standardna brzina tijekom posljednjih nekoliko milijuna godina. Ali onda, prije između šest i osam tisuća godina, uslijedio je novi, važan korak. Izumili smo pismo. Ovo je značilo da su se informacije mogle prenositi s naraštaja na naraštaj bez čekanja na to da ih vrlo spori proces slučajnih mutacija i prirodnog odabiranja kodira u DNK niz. Opseg složenosti silno je porastao. Samo jedan ljubavni roman u džepnom izdanju može sadržavati više informacija nego što iznosi razlika između DNK majmuna i DNK čovjeka, a enciklopedija od trideset svezaka može opisati cjelokupni ljudski DNK niz (il. 6.5).



IL. 6.5

Rast embrija izvan ljudskog tijela omogućit će veće mozgove i veću inteligenciju.

Još je značajnije to što se informacije u knjigama mogu brzo obnavljati. Sadašnja brzina kojom biološka evolucija obnavlja ljudsku DNK iznosi oko jedan bit godišnje. Ali svake godine biva objavljeno dvjesto tisuća novih knjiga, što znači da nastaje milijun bita novih informacija u sekundi. Dakako, najveći dio ovih informacija je smeće, ali ako je samo jedan bit na svakih milijun koristan, to je i dalje sto tisuća puta brže od biološke evolucije.

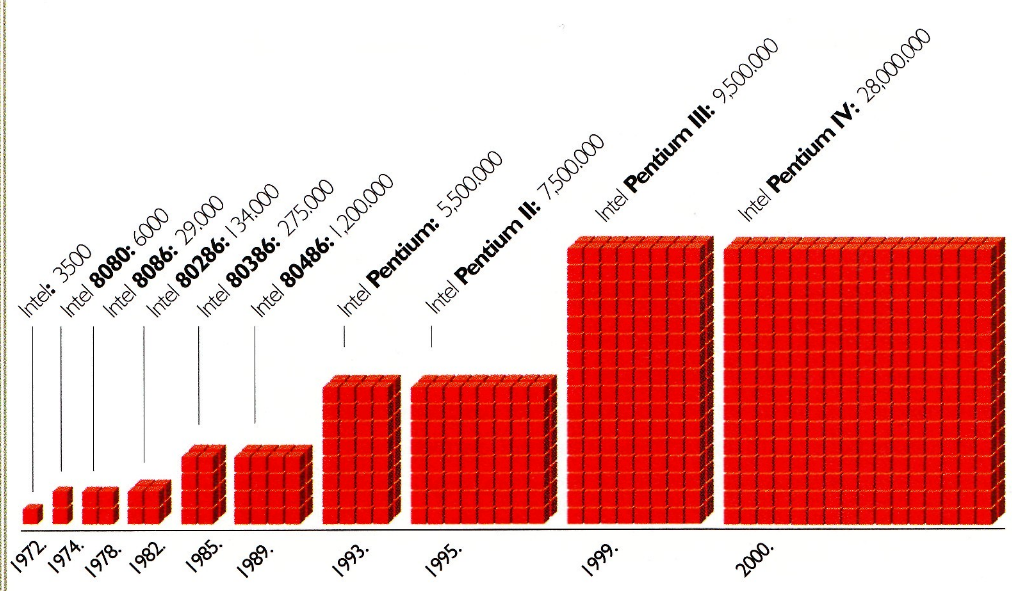
Ovaj prijenos podataka vanjskim, nebiološkim sredstvima omogućio je ljudskoj rasi da zagospodari svijetom, kao i to da nam se populacija eksponencijalno uvećava. Ali sada smo na pragu nove ere u kojoj ćemo biti u stanju povećavati složenost našeg unutarnjeg arhiva, DNK, bez obveze da čekamo na spore procese biološke evolucije. Nije bilo značajnije promjene ljudske DNK tijekom posljednjih deset tisuća godina, ali vrlo je vjerojatno da ćemo biti u stanju potpuno je preustrojiti tijekom ovog, tek započetog, tisućljeća. Dakako, mnogi će reći da treba zabraniti genetski inženjering na ljudima, ali teško da ćemo ga moći spriječiti. Genetski inženjering na biljkama i životinjama nalagat će gospodarski razlozi, a netko će se već naći da to isproba i na ljudima. Osim ako ne zavlada totalitarni svjetski poredak, netko će negdje napraviti poboljšana ljudska bića.

U ovom času, čak i mozak uboge gliste nadmašuje naše kompjutore po računalnoj snazi

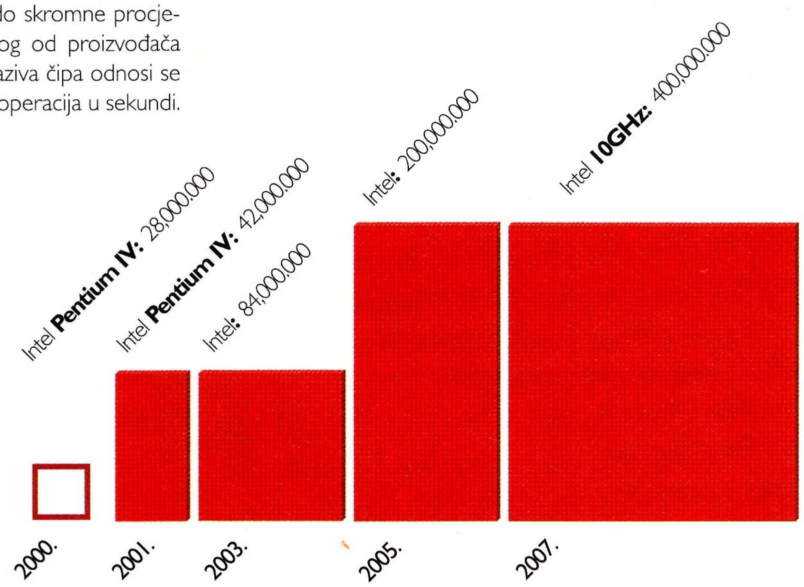
Jasno, pojava poboljšanih ljudskih bića izazvat će velike društvene i političke probleme u odnosu na nepoboljšane ljude. Nemam namjeru ocjenjivati genetski inženjering na ljudima kao poželjan razvoj već želim samo reći da je vjerojatno da će do toga doći, sviđalo se to nama ili ne. Zbog toga mi ne djeluje uvjerljivo znanstvena fantastika poput one opisane u *Zvjezdanim stazama,* u kojoj su ljudi i nakon četiri stotine godina u budućnosti u biti isti kao i mi danas. Mislim da će se vrlo brzo povećavati složenost ljudske rase i njene DNK. Trebalo bi se pomiriti s tim da je to neizbježno te razmotriti kako da se postavimo prema takvom razvoju događaja.

Na izvjestan način, čovječanstvo mora poboljšati svoje mentalne i fizičke osobine kako bi se uspješno suočavalo sa sve složenijim svijetom oko sebe te s novim izazovima, poput putovanja kroz svemir. Ljudi također moraju povećati svoju biološku složenost žele li da biološki sustavi zadrže primat nad elektronskim. U ovom trenutku, na strani računala je brzina, no u njima nema ni traga inteligencije. To nije iznenađujuće, jer naša današnja računala nisu složenija od mozga jedne kišne gliste, vrste koja se baš ne može podičiti bljeskovima inteligencije.

IL. 6.6



Eksponencijalni rast snage računala od 1972. pa sve do skromne procjene za 2007. jednog od proizvođača CPU. Brojka iza naziva čipa odnosi se na broj računskih operacija u sekundi.



Ali kod računala je na snazi ono što se naziva Mooreov zakon: njihova brzina i složenost udvostručuju se svakih osamnaest mjeseci (il. *6.6).* Riječ je o eksponencijalnom rastu koji, jasno, ne može trajati u nedogled. On će se, međutim, vjerojatno nastaviti sve dok računala ne steknu složenost sličnu onoj koju ima ljudski mozak. Neki ljudi smatraju da kompjutori nikada neće moći imati istinsku inteligenciju, što god to bilo. Ali meni se čini da ako vrlo složene kemijske molekule mogu tako zajednički djelovati u ljudima da ovi budu inteligentni, što bi onda moglo spriječiti jednako složene elektronske sklopove da omoguće računalu inteligentno ponašanje. A ako su inteligentna, onda bi po svemu sudeći bila u stanju konstruirati kompjutore još veće složenosti i inteligencije.

Neuronski implantati pružit će poboljšano pamćenje i cjelovite pakete informacija, kao što su neki strani jezici ili sadržaj ove knjige naučen za nekoliko minuta. Ovakvi poboljšani ljudi malo će nalikovati na nas.

Hoće li će se ovo povećavanje biološke i elektronske složenosti nastaviti unedogled ili postoji neka prirodna granica? U biološkom području, ograničenje ljudskoj inteligenciji do sada je predstavljala veličina mozga koji treba proći kroz rodnicu pri rađanju. Budući da sam promatrao rađanje moje troje djece, znam koliko je teško da glava izađe van. Ali očekujem da ćemo za stotinjak godina moći uzgajati djecu izvan ljudskog tijela, tako da će ova prepreka

KRATKA POVIJEST SVEMIRA

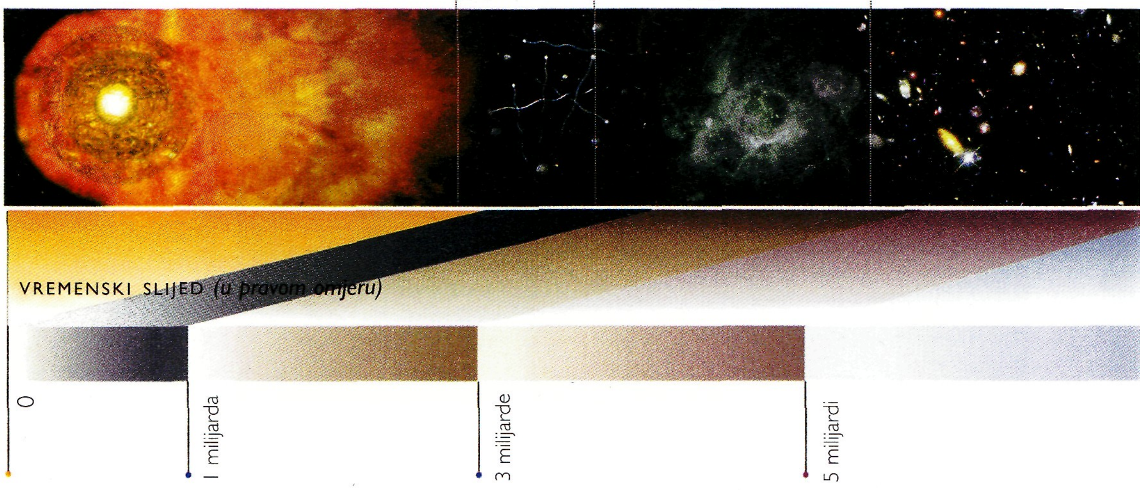
DOGAĐAJI *(nije u pravom omjeru)*

0,00003 milijarde godina.
Veliki prasak i vrlo vruć, optički neproziran inflacijski svemir.

Razdvajanje materije i energije. Svemir postaje proziran.

Milijarda godina.
Nakupine materije oblikuju protogalaktike; sinteza težih atomskih jezgri.

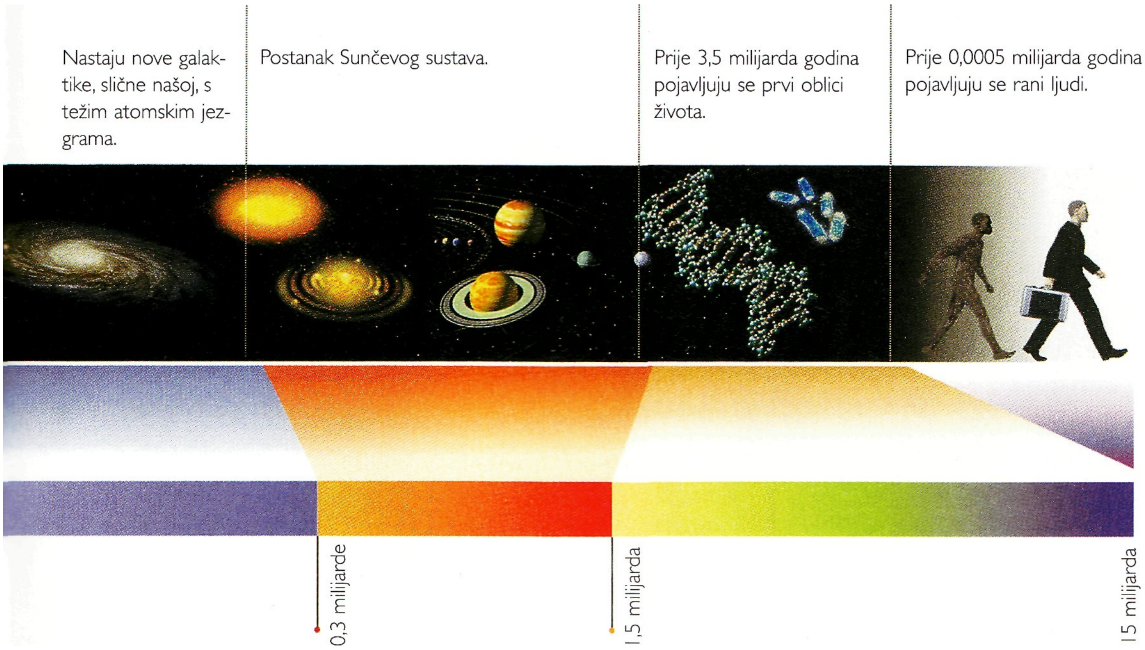
Tri milijarde godina. Galaktike snimljene svemirskim teleskopom Hubble u programu istraživanja dubokog svemira.



(IL. 6.7)
Ljudska rasa postoji samo sićušni dio povijesti svemira. (Da na ovom crtežu vrijeme postojanje ljudi prikažemo dužinom od 7 cm, onda bi grafikon koji obuhvaća cijelu povijest svemira bio duži od jednog kilometra.) Izvanzemaljski život na koje bismo mogli naići bio bi vjerojatno znatno primitivniji ili znatno napredniji od našega.

biti uklonjena. Međutim, povećanje veličine ljudskog mozga genetskim inženjeringom suočit će se s nepovoljnom okolnošću da su tjelesni kemijski glasnici, preko kojih se odvija naša mentalna aktivnost, razmjerno spori. To znači da će daljnje povećanje složenosti mozga ići nauštrb brzine. Možemo biti brzi u mentalnom reagiranju ili vrlo inteligentni, ali ne i jedno i drugo. Smatram ipak da ćemo postati znatno inteligentniji od većine junaka *Zvjezdanih staza,* što možda i nije tako teško.

Elektronski sklopovi suočeni su s istim problemom odnosa složenosti i brzine kao i ljudski mozak. U ovom slučaju, međutim, signali su električni, ne kemijski, i kreću se brzinom svjetlosti koja je daleko veća. No, brzina svjetlosti već danas predstavlja praktično ograničenje pri projektiranju bržih računala. Situacija se može poboljšati tako što će se praviti manji sklopovi, ali konačno će se naići na posljednju granicu: atomističku gradu materije. No, čeka nas još dug put dok ne stignemo do te prepreke.



Drugi način na koji elektronski sklopovi mogu povećati svoju složenost uz zadržavanje brzine je kopiranje ljudskog mozga. Mozak, naime, nema samo jednu središnju procesnu jedinicu (CPU) koja obrađuje sve naredbe u nizu. Naprotiv, na djelu su milijuni procesora koji istodobno rade svi zajedno. Ovakav opsežan paralelan rad odredit će budućnost i elektronske inteligencije.

Pod pretpostavkom da ne uništimo sami sebe tijekom sljedećih stotinu godina, vjerojatno je da ćemo se prvo raširiti po planetima Sunčevog sustava, a onda i po planetnim sustavima obližnjih zvijezda. Ali to neće biti na način serije *Zvjezdane staze* ili *Babilon* 5, gdje u gotovo svakom zvjezdanom sustavu susrećemo rasu gotovo ljudskih bića. Ljudska rasa postoji u svom sadašnjem obliku samo dva milijuna godina, od petnaest milijarda koliko je proteklo od Velikog praska (il. 6.7).

BIOLOŠKO-ELEKTRONSKO SUČELJE

Za dvadesetak godina bi računalo od tisuću dolara moglo po složenosti dostići ljudski mozak Usporedni procesori mogli bi oponašati način rada našeg mozga, tako da bi računalo djelovalo na inteligentan i svjestan način.

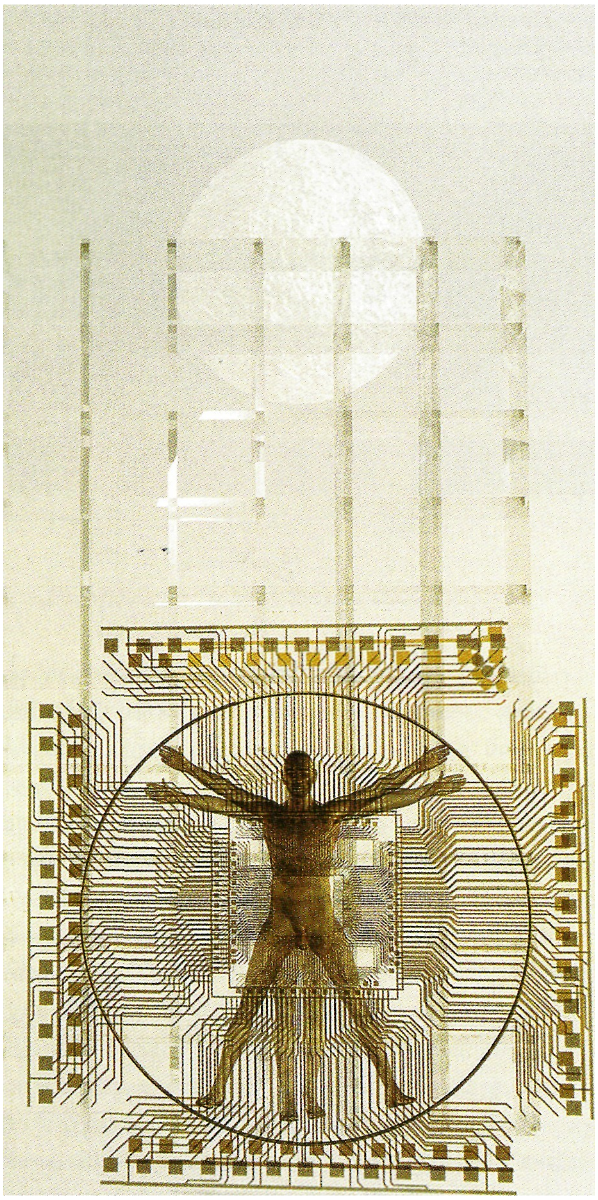
Neuronski implantati mogli bi omogućiti znatno brže sučelje između mozga i računala, što bi premostilo udaljenost između biološke i elektronske inteligencije,

U bliskoj budućnosti, većinu poslovnih transakcija vjerojatno će obavljati kiber-osobnosti preko Svjetske mreže (WWW).

Za deset godina mnogi od nas mogli bi odabrati živjeti virtualnim životom na Mreži, uspostavljajući kibernetska prijateljstva i veze.

Razumijevanje ljudskog genoma nesumnjivo će dovesti do velikog napretka u medicini, ali će nam i omogućiti značajno povećanje složenost građe ljudske DNK. Tijekom sljedećih nekoliko stotina godina, genetski inženjering na ljudima mogao bi nadomjestiti biološku evoluciju, preoblikujući ljudsku rasu i otvorivši potpuno nova etička pitanja.

Putovanje izvan Sunčevog sustava vjerojatno će zahtijevati ili genetski izmijenjene ljude ili kompjutorski upravljane sonde bez ljudske posade.



Ako se, dakle, život razvio i u drugim zvjezdanim sustavima, vrlo je mala vjerojatnost da ga zateknemo u fazi koja bi bila prepoznatljivo ljudska. Izvanzemaljski život koji ćemo možda sresti bit će po svemu sudeći ili znatno niži od nas ili znatno razvijeniji. Ako je razvijeniji, zbog čega se onda nije raširio Galaktikom i posjetio Zemlju? Kad bi izvanzemaljci došli ovamo, to bismo primijetili: posjet bi bio sličniji *Danu nezavisnosti* nego *E.T-u.*

Kako se, dakle, može objasniti nedolazak izvanzemaljskih posjetitelja? Zamislivo je da u svemiru postoji razvijena rasa koja je svjesna našeg postojanja, ali nas pušta da se kuhamo u vlastitoj primitivnoj kaši. Teško, međutim, da bi ona bila tako ljubazna prema jednom nižem obliku života: tko od nas mari za to da li ćemo zgaziti nekog kukca ili glistu? Prihvatljivije je objašnjenje silno malena vjerojatnost pojave života na drugim planetima, odnosno razvoja inteligencije. Budući da za sebe tvrdimo da smo inteligentni, premda ne baš osnovano, skloni smo smatrati inteligenciju neizbježnim ishodom evolucije. To se, međutim, može dovesti u pitanje. Nije jasno ima li inteligencija vrijednost od značaja po opstanak. Bakterijama je sasvim dobro i bez inteligencije i nadživjet će nas ako naša nazovi-inteligencija dovede do toga da uništimo sami sebe u nuklearnom ratu. Moguće je stoga da ćemo pri istraživanju Galaktike naići na neki oblik jednostavnog života, ali vjerojatno ne na bića slična nama.

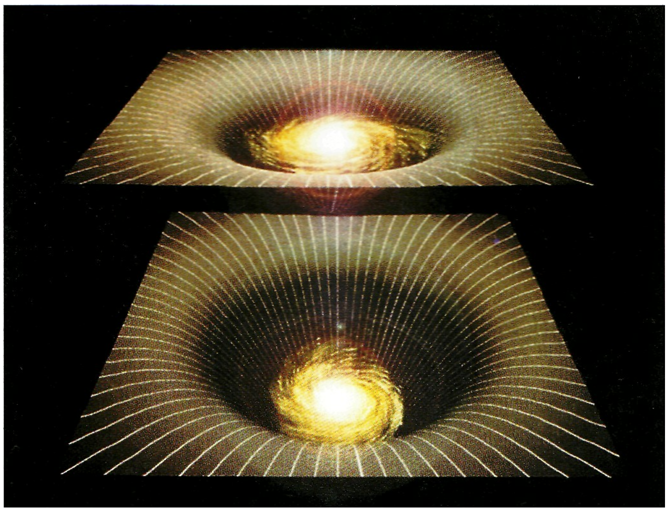
Posjeduje li inteligencija odliku dugotrajnog preživljavanja?

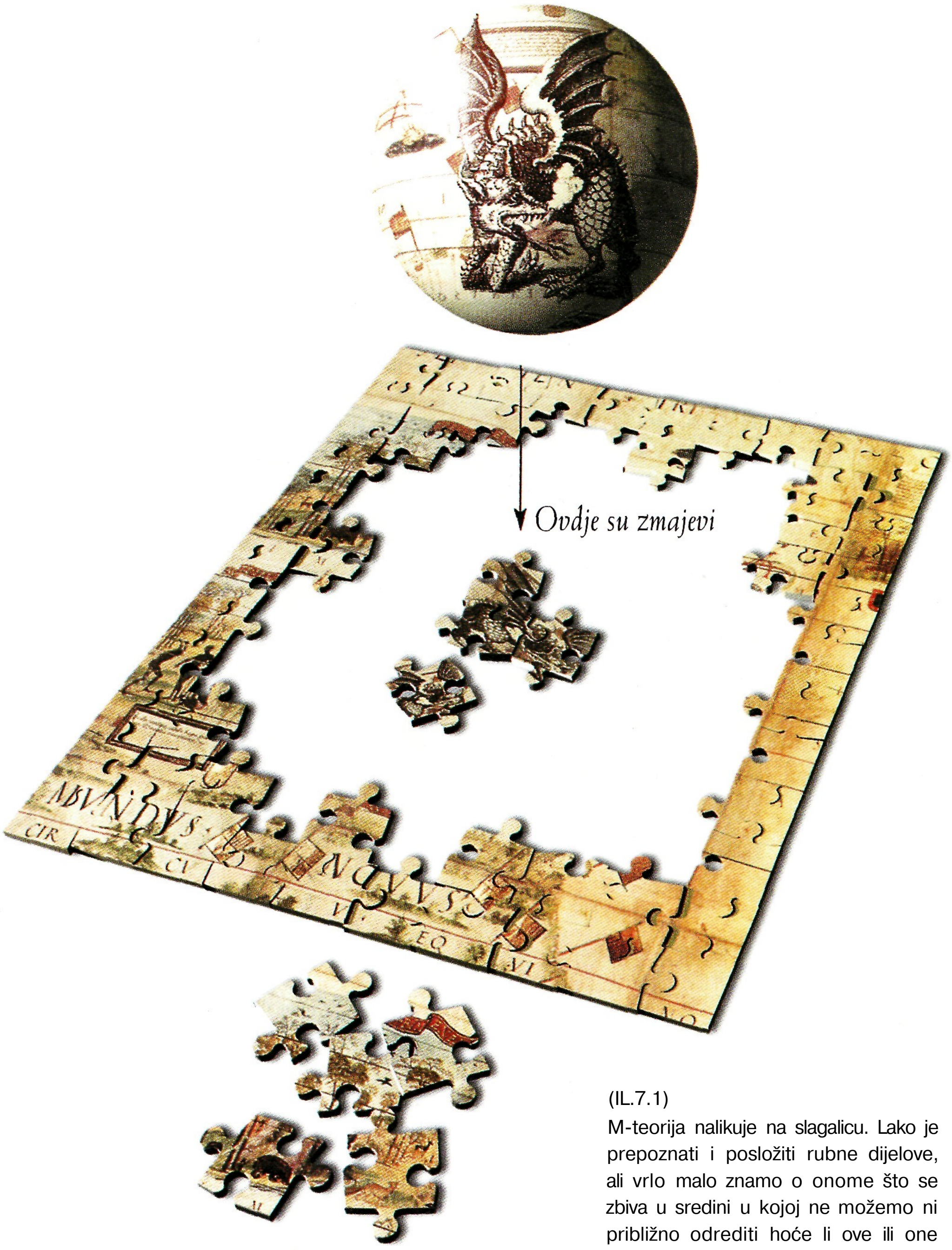
Budućnost znanosti neće biti ružičasta poput one utješne slike iz *Zvjezdanih staza;* svemir koji nastanjuju mnoge humanoidne rase, s razvijenom, ali zapravo statičnom znanošću i tehnologijom. Umjesto toga, mislim da ćemo biti sami, ali da će nam se zato brzo povećavati biološka ili elektronska složenost. Neće se mnogo toga još osjetiti u sljedećih stotinu godina, vremenski odsječak za koji se s kolikom-tolikom pouzdanošću možemo upustiti u predviđanja. Ali krajem ovog tisućljeća, ako ga čovječanstvo preživi, stvarni svijet će se temeljito razlikovati od *Zvjezdanih staza*.

POGLAVLJE 7

BRANSKI NOVI SVIJET

Živimo li na nekoj brani ili smo samo hologrami?

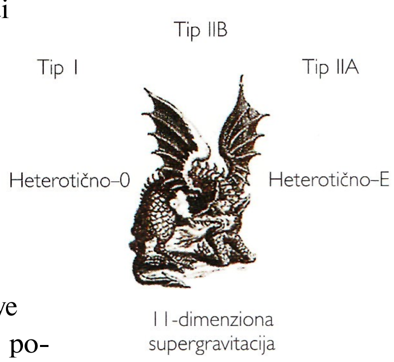


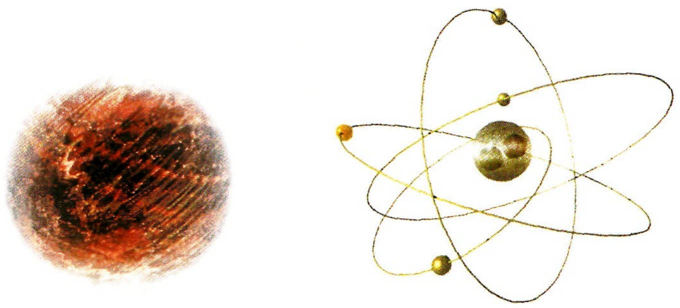


(IL.7.1)
M-teorija nalikuje na slagalicu. Lako je prepoznati i posložiti rubne dijelove, ali vrlo malo znamo o onome što se zbiva u sredini u kojoj ne možemo ni približno odrediti hoće li ove ili one veličine biti malene.

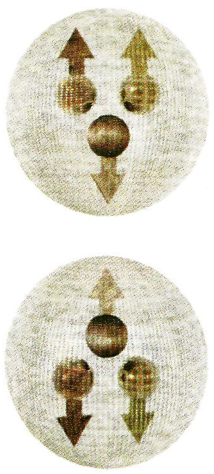
KAKO ĆE NAŠE ISTRAŽIVAČKO PUTOVANJE IZGLEDATI U budućnosti? Hoće li nam uspjeti izrada potpune jedinstvene teorije koja objašnjava svemir i sve što on sadrži? U stvari, kao što je opisano u drugom poglavlju, možda smo u M-teoriji našli tu teoriju svega. Ova teorija nema samo jednu formulaciju, bar koliko nam je to poznato. Umjesto toga, otkrili smo mrežu naizgled različitih teorija koje sve, kako izgleda, predstavljaju aproksimacije iste temeljne teorije s različitim ograničenjima, u smislu u kome je Newtonova teorija gravitacije aproksimacija Einsteinove opće teorije relativnosti, primjenjiva za slabo gravitacijsko polje. M-teorija sliči na slagalicu: najlakše je prepoznati i uklopiti rubne dijelove, granična područja M-teorije, gdje razne veličine imaju malu vrijednost. Kao kod neke slagalice, dobili smo prilično dobru predodžbu o rubovima slike, što je najlakše, ali u središtu slagalice zvane M-teorija i dalje zjapi rupa u kojoj ne znamo što se zbiva (il. 7.1). Nećemo moći ustanoviti da smo postavili teoriju svega prije nego ta rupa ne bude popunjena.

Sto je u središtu M-teorije? Hoćemo li tu otkriti zmajeve (ili nešto podjednako neobično) kao na starim kartama neistraženih zemalja? Naše dosadašnje iskustvo nagovješćuje nam da ćemo nailaziti na neočekivane nove pojave čim se područje promatranja produbi u sve manje razmjere. Na početku dvadesetog stoljeća razumjeli smo kako priroda djeluje u okviru klasične fizike, što je sasvim zadovoljavajuće u rasponu od meduzvjezdanih udaljenosti pa sve do približno jedne stotinke milimetra. Klasična fizika polazi od pretpostavke da je materija neprekinuti medij koji se





(*iL* 7.2)
Desno: Klasični nedjeljivi atom
Dalje desno: Atom s elektronima koji kruže oko jezgre građene od protona i neutrona.



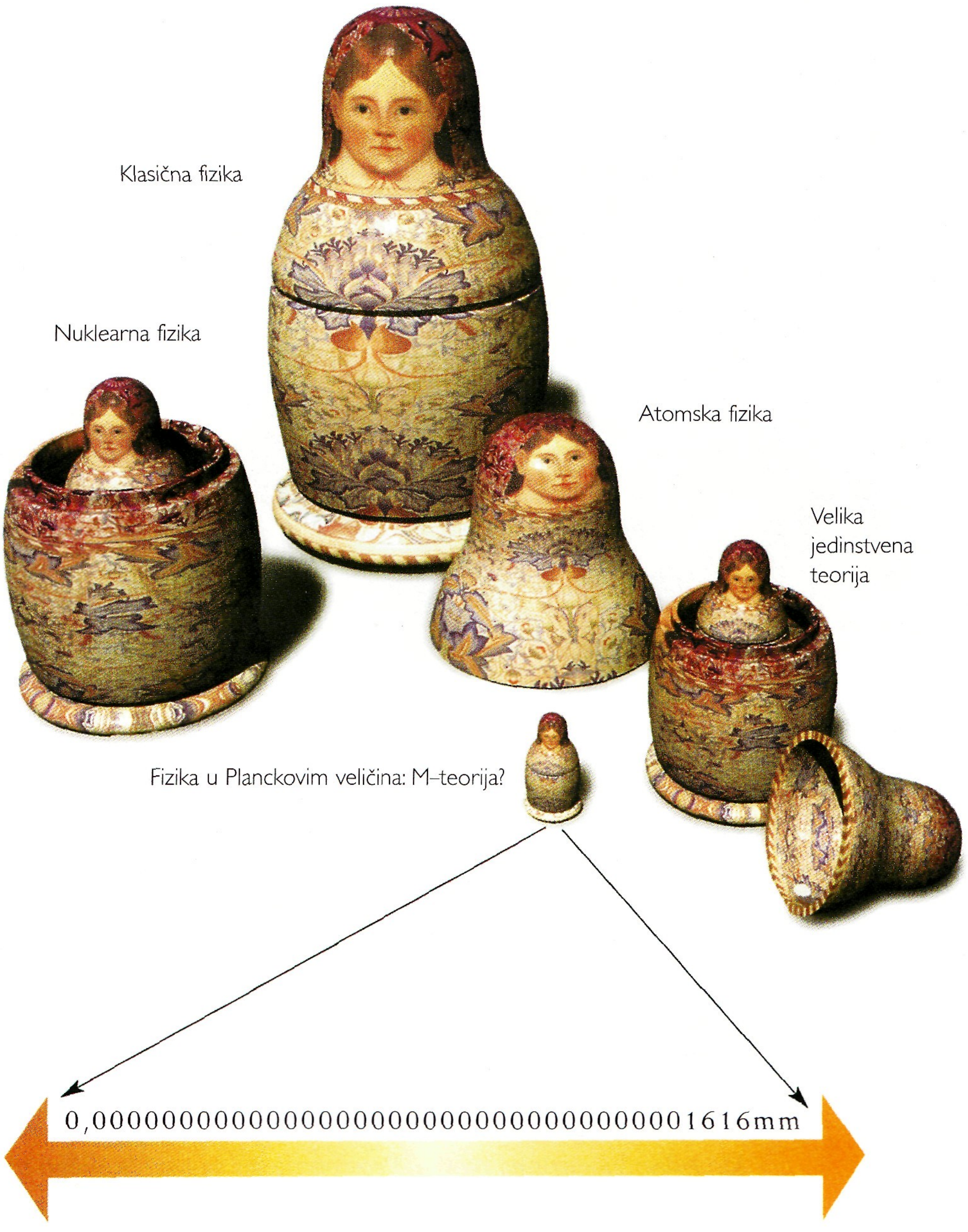
(Il. 7.3)
Gore: Proton se sastoji od dva gornja kvarka, od kojih svaki ima električni naboj +2/3, i jednog donjeg kvarka s električnim nabojem -1/3. Dolje: Neutron se sastoji od dva donja kvarka (svaki -1/3) i jednog gornjeg kvarka (+2/3).

odlikuje svojstvima kakva su elastičnost i viskoznost, ali zatim su se počeli gomilati nalazi koji su govorili da materija nije glatka već zrnata: građena je od sićušnih građevnih opeka nazvanih atomi. Riječ atom potječe iz grčkog i znači nedjeljiv, no ubrzo se ustanovilo da se atomi sastoje od elektrona koji kruže oko jezgre koja je pak složena od protona i neutrona (il. 7.2).

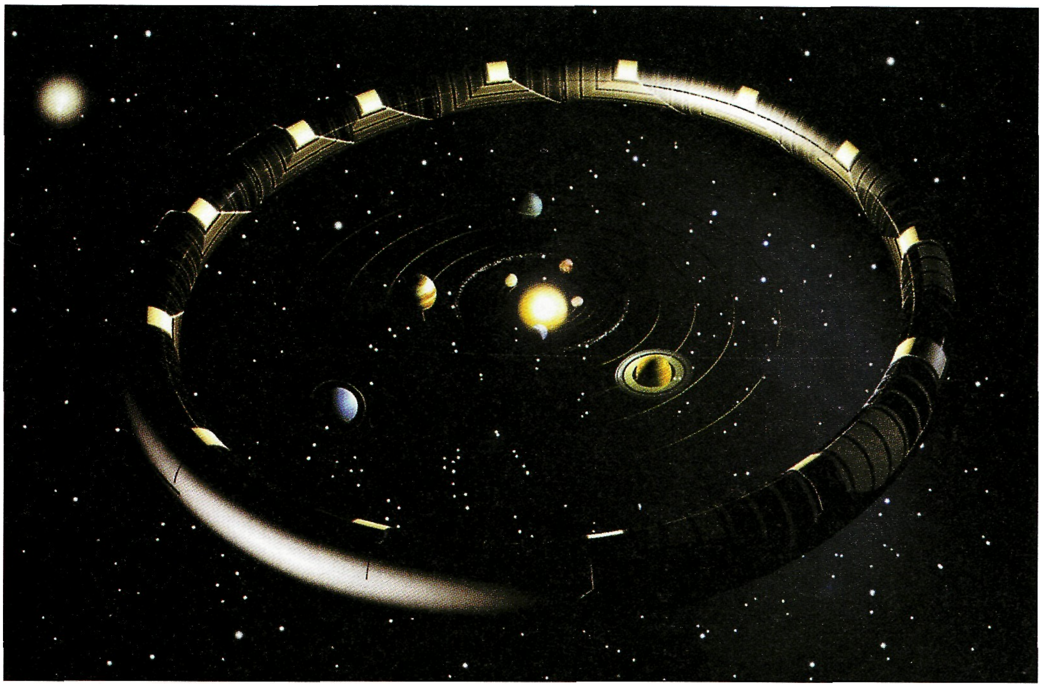
Istraživanja u atomskoj fizici tijekom prvih trideset godina dvadesetog stoljeća proširila su naše razumijevanje grade mikrosvijeta sve do veličina od milijuntog dijela milimetra. A onda smo otkrili da su čak i protoni i neutroni građeni od još manjih čestica nazvanih kvarkovi (il. 7.3).

Najnovija istraživanja u nuklearnoj fizici i fizici visokih energija spustila su nas do veličina koje su manje za još milijardu puta. Moglo bi izgledati da se otkrivanje ustrojstava sve manjih i manjih veličina može nastaviti unedogled. Postoji, međutim, konačna granica ovog niza, baš kao što postoji granica ruskih babuški u babuškama (il. 7.4).

Na kraju se stiže do najmanje babuške koja se više ne može otvoriti. U fizici se najmanja babuška naziva Planckova dužina. Da bi se prodrlo u te kraće dužine, bile bi neophodne čestice tako visoke energije da bi one bile unutar crnih jama. Ne znamo točno koliko je velika temeljna Planckova dužina u M-teoriji, ali moguće je da iznosi samo jednu stotisućinku milijardinke milijardinke milijardinke milimetra. Nema planova za izgradnju ubrzivača čestica koje mogu proniknuti u tako male dužine. Ti bi ubrzivači morali biti veći od



(II 7.4) Svaka babuška predstavlja po jedno teorijsko razumijevanje prirode u sve manjim dužinskim veličinama. U svakoj se nalazi manja babuška koja odgovara teoriji što opisuje prirodu u kraćim dužinama. Ali u fizici postoji najmanja osnovna dužina, Planckova dužina, veličina u kojoj bi se priroda mogla opisati M-teorijom.



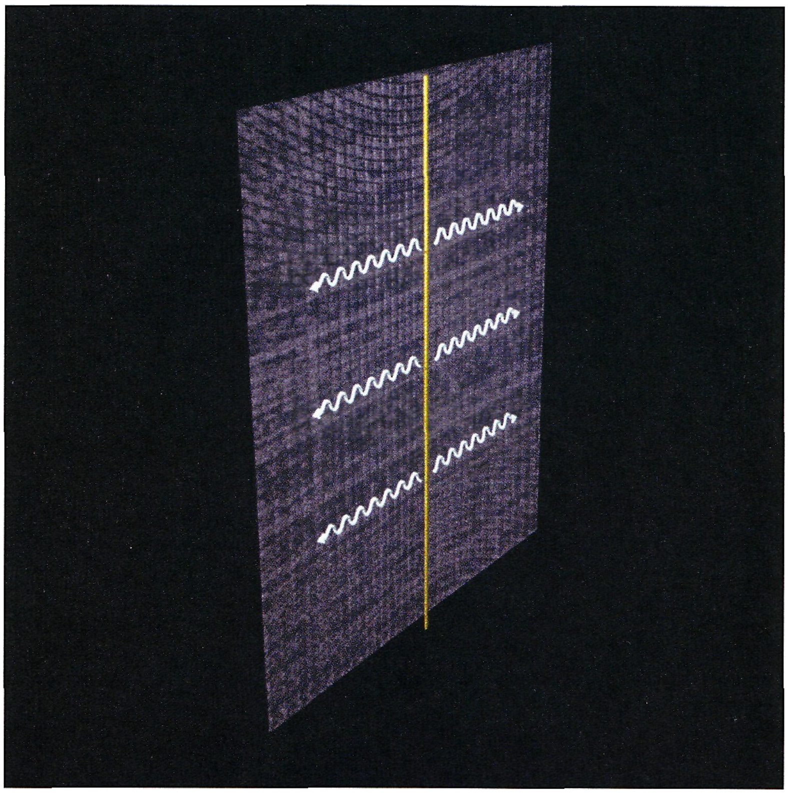
(IL. 7.5)
Veličina akceleratora potrebnog da se pronikne do dužina malih poput Planckove nadmašila bi promjer Sunčevog sustava.

Sunčevog sustava, a nema izgleda da bi se za njih našao novac u sadašnjem financijskom ozračju (il. *7.5)*.

Ipak, svjedoci smo vrlo zanimljivog novog razvoja istraživanja koje daje nadu da bismo mogli lakše (i jeftinije) otkriti bar neke zmajeve M-teorije. Kao što je objašnjeno u poglavljima 2 i 3, u sklopu matematičkih modela nazvanih M-teorija ima deset ili jedanaest dimenzija. Donedavno se smatralo da bi šest odnosno sedam dodatnih dimenzija bilo zajedno sklupčano u vrlo malim razmjerima. Pojavna slika tih prikrivenih dimenzija mogla bi se usporediti s ljudskom kosom (il. *7.6)*.

Ako pomoću povećala pogledate jednu dlaku, uočit ćete da ima debljinu, ali gledana golim okom dlaka izgleda kao pravac, dakle jednodimenziona tvorba. Prostorvrijeme je možda slično tome: u veličinama svakodnevne, zatim atomske, pa čak i nuklearne fizike ono izgleda četverodimenziono i gotovo ravno. No ako pomoću čestica izuzetno visoke energije počnete istraživati vrlo kratke udaljenosti, trebalo bi se uočiti da prostorvrijeme ima deset ili jedanaest dimenzija.

(Il 7.6)
Viđena golim okom, vlas kose izgleda kao linija; njena jedina dimenzija kao da je dužina. Slično tome, prostorvrijeme nam može izgledati četverodimenziono, ali ako ga ispitujemo pomoću visokoenergetskih čestica moglo bi se pokazati da je desetodimenziono ili jedanaestodimenziono.



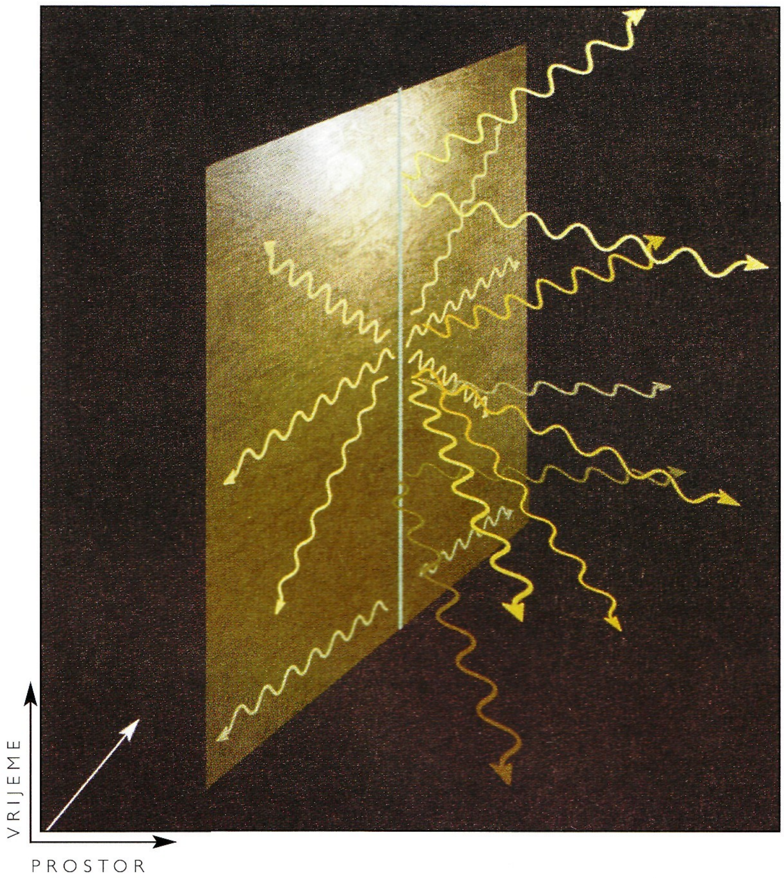
(IL 7.7) BRANSKI SVIJET

Električna sila bila bi ograničena na branu i opadala bi po točno takvom zakonu da elektroni imaju stabilne staze oko jezgara atoma.

Ako bi sve dodatne dimenzije bile vrlo male, bilo bi vrlo teško uočiti ih. Nedavno je, međutim, izložena zamisao da su jedna ili više ovih dodatnih dimenzija možda razmjerno velike ili su čak beskonačne. Velika prednost ove ideje (barem za jednog pozitivista kakav sam ja) je u tome što se možda može provjeriti u sljedećoj generaciji akceleratora ili vrlo točnim mjerenjima gravitacijske sile na kratkim udaljenostima. Ova promatranja mogla bi ili pokazati da je teorija kriva ili eksperimentalno potvrditi postojanje drugih dimenzija.

Zamisao o velikim dodatnim dimenzijama je uzbudljiv novi zaokret u traganju za konačnim modelom ili konačnom teorijom. One bi ukazale na zaključak da živimo na jednoj četverodimenzionoj površini ili brani u jednom višedimenzionom prostorvremenu.

Materija i negravitacijske sile, poput električne, bile bi ograničene na branu. Sve što ne uključuje gravitaciju ponašalo bi se stoga kao u četiri dimenzije, a posebno bi električna sila između atomske

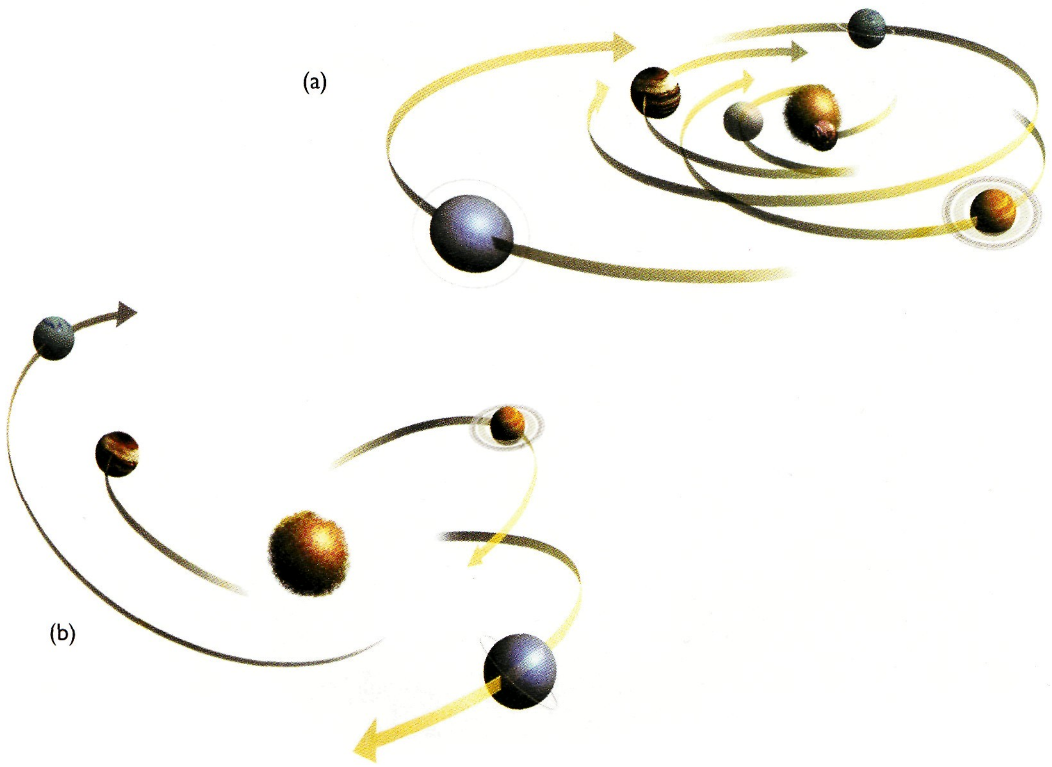


jezgre i elektrona koji kruže oko njih slabila s povećanjem udaljenosti u točno takvom iznosu da atomi budu postojani i ne dopuste elektronima da padnu na jezgru (il. 7.7).

Ovo bi bilo u suglasju s antropskim načelom prema kojem svemir mora biti pogodan za inteligentni život: da atomi nisu stabilni, ne bismo postojali mi da promatramo svemir i pitamo se zbog čega on izgleda četverodimenzion.

Za razliku od toga, gravitacija u obliku zakrivljenog prostora ispunjavala bi sveukupno višedimenziono prostorvrijeme. To znači da bi se gravitacija ponašala drukčije od ostalih sila za koje znamo: budući da bi bila proširena i u dodatne dimenzije, brže bi opadala s povećanjem udaljenosti nego što bi se to očekivalo (il. 7.8).

(Il. 7.8)
Gravitacija bi se širila i u dodatne dimenzije i djelovala bi duž brane, a opadala bi brže s povećanjem udaljenosti nego je to slučaj u četiri dimenzije.

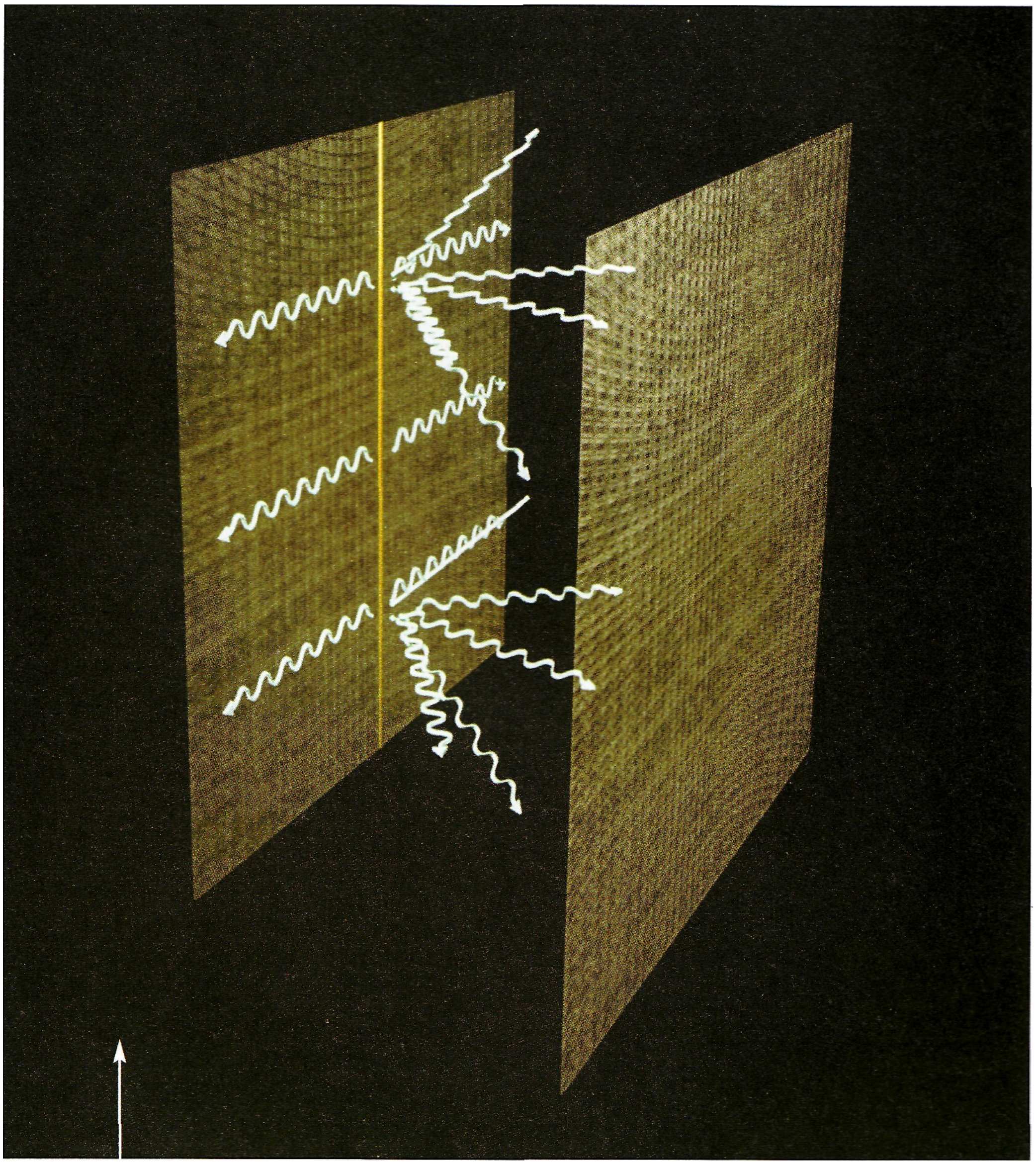


(IL. 7.9)
Brže opadanje gravitacijske sile s povećanjem udaljenosti stvorilo bi stanje u kojem bi staze planeta bile nestabilne. Planeti bi se ili srušili na Sunce (a) ili se potpuno otrgli njegovoj privlačnoj sili (b).

Ako se ovo brzo opadanje gravitacijske sile proširi na astronomske udaljenosti, zapazili bismo njegov utjecaj na staze planeta. One bi bile nepostojane, kao što je primijećeno u poglavlju 3: planeti bi se ili srušili na Sunce ili bi odbjegli u tamu i hladnoću međuzvjezdanog prostora (il. 7.9).

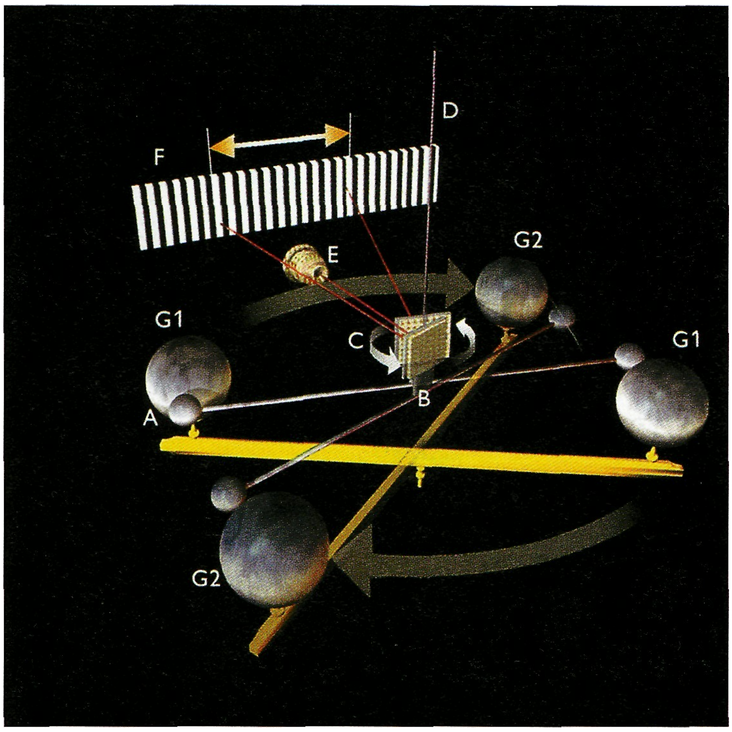
To se, međutim, ne događa, a i ne bi dogodilo ako bi se dodatne dimenzije završavale na drugoj brani ne predalekoj od brane na kojoj mi živimo. Tada se preko udaljenosti većih od razmaka između brana gravitacija ne bi mogla slobodno prostirati, već bi djelotvorno bila ograničena na branu, poput električne sile, i ponašala se tako da bi staze planeta bile stabilne (il. 7.10).

S druge strane, na udaljenostima manjim od razmaka između brana, gravitacija bi se brže mijenjala. Vrlo mala gravitacijska sila iz-



Dodatne dimenzije

(IL 7.10) Druga brana blizu našeg branskog svijeta spriječila bi gravitaciju da se raširi daleko u dodatne dimenzije, a to znači da bi na udaljenostima većim od razmaka između brana gravitacija opadala po zakonu kakav bi se očekivao kod četiri dimenzije.

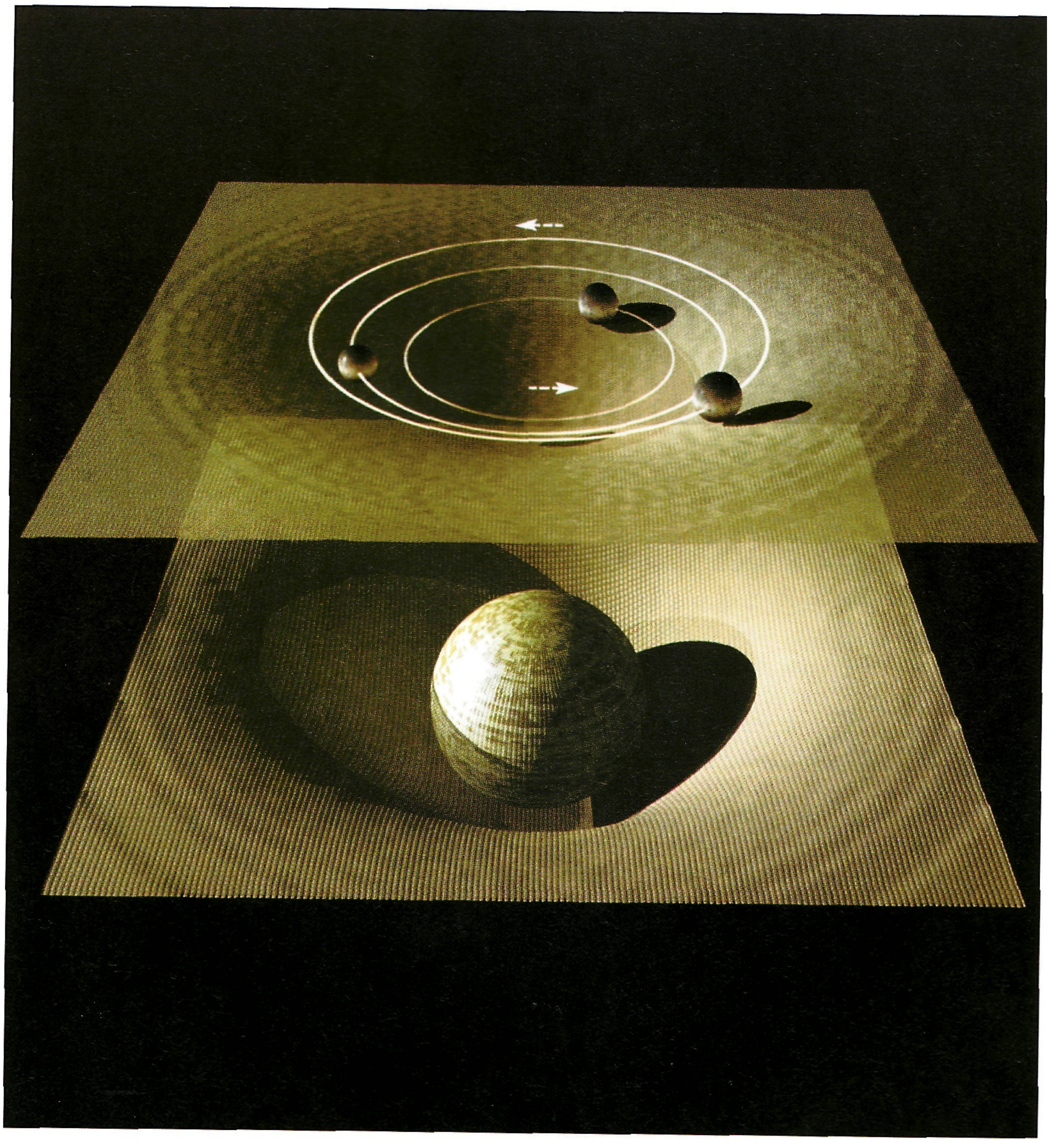


(IL7.II)
CAVENDISHEV
POKUS

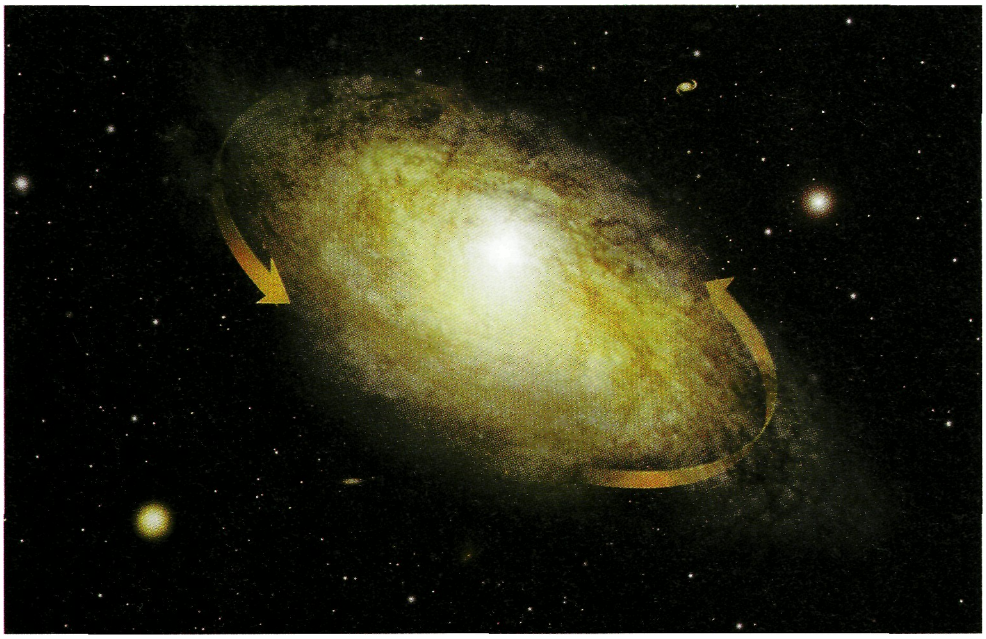
Laserski snop (E) koji se projicira na kalibrirani ekran (F) i označava zakret para malih kugli (bočica). Dvije male olovne kugle (A) spojene su šipkom u oblik bočice (B) na kojoj je maleno zrcalo u sredini (C) i koja slobodno visi na torzionoj niti (D).
Dvije velike olovne kugle (G) postavljene su na krajevima jedne zakretne šipke blizu malih. Kako se veće olovne kugle pomiču na jednu i drugu stranu para malih kugli, bočica s malim kuglama počinje oscilirati, a onda se umiri u novom položaju.

medu teških tijela točno je izmjerena u laboratoriju, ali dosadašnji pokusi nisu otkrili učinke brana udaljenih međusobno manje od nekoliko milimetara. Trenutno se poduzimaju nova mjerenja na kraćim razmacima.

U ovom branskom svijetu, mi bismo živjeli na jednoj brani, ali bi odmah tu u blizini postojala još jedna "brana-sjena". Budući da bi svjetlost bila ograničena na pojedinačne brane i ne bi se širila kroz međuprostor, ne bismo mogli vidjeti taj svijet-sjenu. Ali osjećali bismo gravitacijski utjecaj materije s brane-sjene. Na našoj brani ta gravitacijska sila izgledala bi kao da niče iz izvora koji su doista "tamni", u smislu da je jedini način na koji ih možemo otkriti njihova gravitacija (il. 7.12). Zapravo, da bi se objasnila brzina kojom zvijezde kruže oko središta naše Galaktike, mora, kako izgleda, postojati više mase nego što iz promatranja zaključujemo da je ima.



(IL. 7.12) U scenariju branskog svijeta, planeti mogu kružiti oko neke tamne mase na brani-sjeni zato što se gravitacijska sila pruža u dodatne dimenzije.



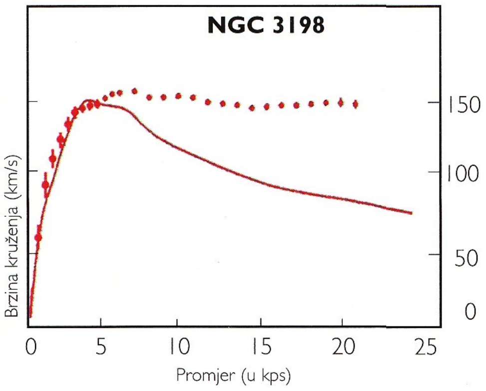
DOKAZ POSTOJANJA TAMNE MATERIJE

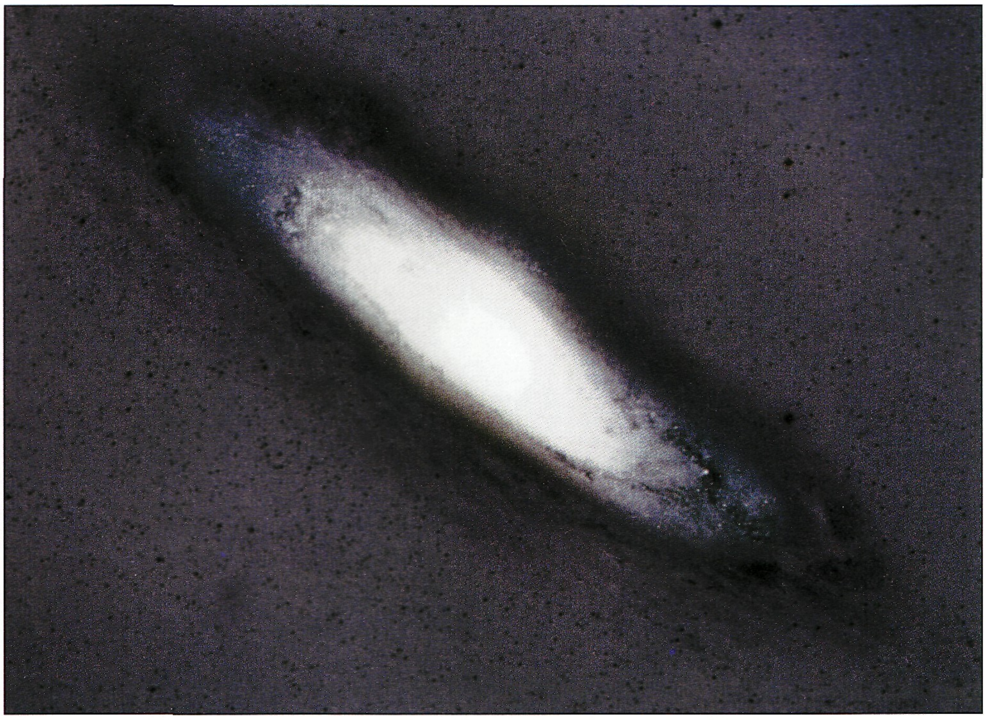
Razna kozmološka promatranja idu u prilog pretpostavci da u našoj Galaktici i drugim galaktikama ima znatno više tvari nego što je vidimo. Najuvjerljivije među njima je ono koje se odnosi na opažačke podatke, a to je da se zvijezde na rubovima spiralnih galaktika poput Mliječne Staze gibaju oko središta galaktike znatno brže nego što bi to trebalo u ukupnom gravitacijskom polju svih vidljivih zvijezda, (vidjeti str 187).

Od sedamdesetih godina znamo za taj nesklad između zabilježenih galaktičkih brzina gibanja zvijezda na vanjskim područjima spiralnih galaktika (označenih točkicama na dijagramu) i brzina koje bi se očekivale prema Newtonovim zakonima na temelju rasporeda vidljivih zvijezda u Galaktici (puna krivulja na dijagramu). Ovaj nesklad upućuje na to da bi trebalo postojati znatno više tvari u vanjskim dijelovima spiralnih galaktika.

ROTACIJSKA KRIVULJA ZA GALAKTIKU NGC 3198

Albada & Sancisi 1986

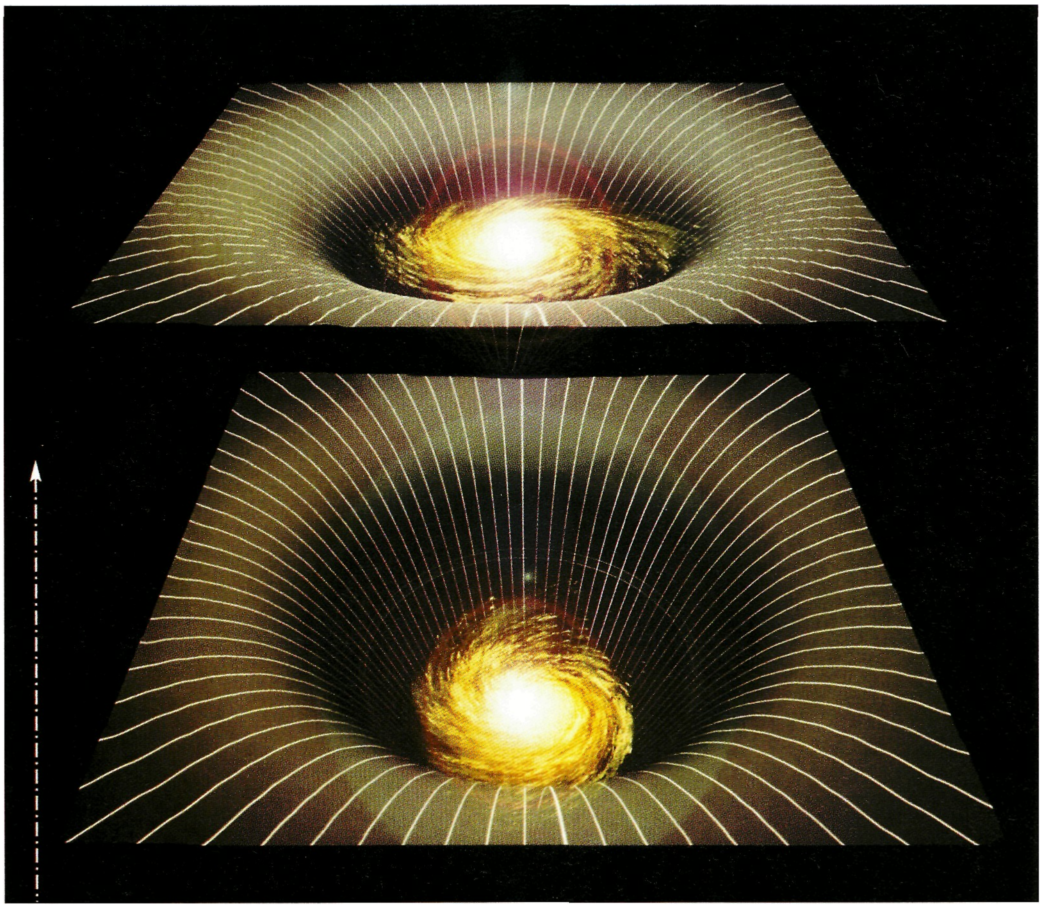




PRIRODA TAMNE TVARI

Kozmolozi sada vjeruju da, dok se središnji dijelovi spiralnih galaktika sastoje poglavito od običnih zvijezda, rubnim dijelovima prevladava tamna tvar koju ne možemo vidjeti izravno. Ali jedan od temeljnih problema je otkriti prirodu prevladavajućeg oblika tamne tvari u tim vanjskim područjima galaktika. Prije osamdesetih godina smatralo se da je tamna tvar zapravo obična tvar građena od protona, neutrona i elektrona u nekom obliku koji nije lako otkriti: možda u obliku plinovitih oblaka ili "masivnih sabijenih objekata u halou", takozvanih MACHO-a, kao što su bijeli patuljci, neutronske zvijezde, pa čak i crne jame.

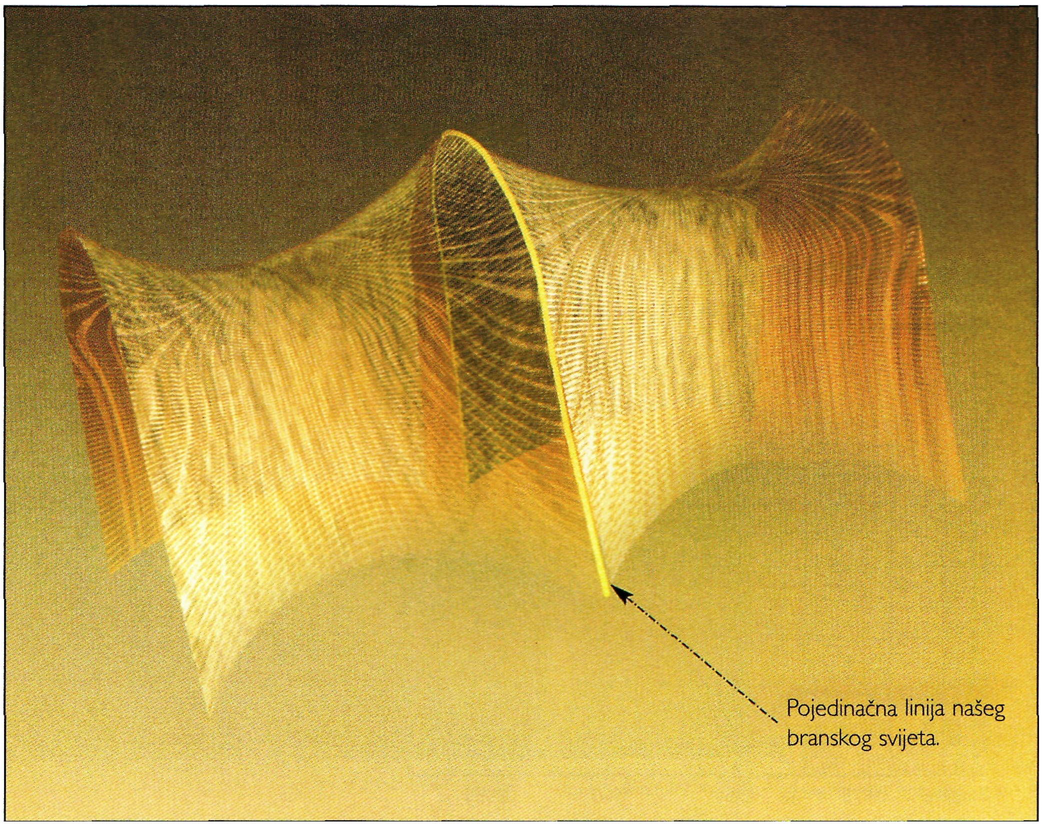
No, posljednja proučavanja nastanka galaktika navela su kozmologe na pretpostavku da se značajan dio tamne tvari mora po obliku razlikovati od obične tvari. Možda ona potječe od masa vrlo lakih elementarnih čestica kao što su aksioni ili neutrini. Nije isključeno ni da se sastoji od egzotičnijih vrsta čestica, kakve su WIMP-ovi (masivne čestice slabog međudjelovanja), čije postojanje predviđaju suvremene teorije elementarnih čestica, premda još nisu otkrivene u pokusima.



Ničija zemlja dodatnih dimenzija koja se pruža između brana.

(IL.7.13)
Ne bismo vidjeli galaktiku-sjenu na brani-sjeni zato što se svjetlosni valovi, za razliku od gravitacijskih, ne šire kroz dodatne dimenzije. Na vrtnju naše Galaktike djelovala bi tamna materija koju ne možemo vidjeti.

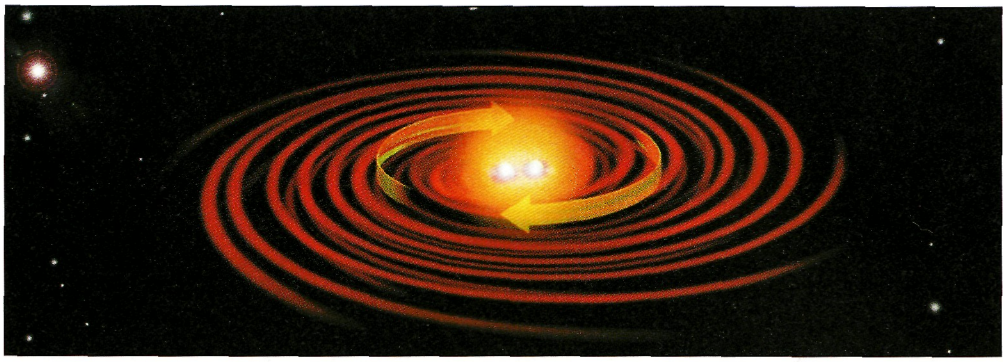
Ova nedostajuća masa mogla bi potjecati od nekih egzotičnih vrsta čestica u našem svijetu, kakve su WIMP-ovi (slabo medudjelujuće masivne čestice) ili aksioni, vrlo lagane elementarne čestice. Ali nedostajuća masa mogla bi ukazivati i na postojanje svijeta-sjene koji sadrži materiju. Možda se u njemu nalaze ljudi-sjene kojima glavobolju također zadaje nedostajuća masa u njihovom svijetu, bez koje ne mogu objasniti staze zvijezda-sjena oko središta galaktike-sjene (il. 7.13).

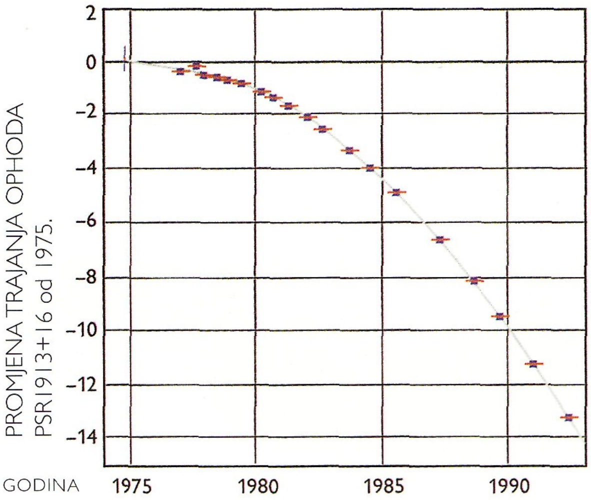


(Il 7.14)
U Randall-Sundrum modelu postoji samo jedna brana (prikazana ovdje u samo jednoj dimenziji). Dodatne dimenzije pružaju se u beskonačnost, ali su zakrivljene u obliku sedla. Ova zakrivljenost sprečava gravitacijsko polje tvari na brani da se širi daleko u dodatne dimenzije.

Umjesto da dodatne dimenzije završavaju na drugoj brani, moguće je također da su one beskonačne, ali vrlo zakrivljene, poput sedla (il. 7.14). Lisa Randall i Raman Sundrum pokazali su da bi ova vrsta zakrivljenosti djelovala potpuno slično kao neka druga brana: gravitacijsko djelovanje na neko tijelo na brani bilo bi ograničeno na neposrednu okolinu oko nje, ne pružajući se beskonačno u dodatnim dimenzijama. Kao u modelu brane-sjene, opadanje gravitacije s povećanjem udaljenosti bilo bi upravo onakvo kakvo je potrebno da se objasne planetne staze i laboratorijska mjerenja gravitacijske sile, ali bi se gravitacija brže mijenjala na kraćim udaljenostima.

Postoji, međutim, jedna značajna razlika između ovog modela Randallove i Sundruma i modela brane-sjene. Tijela koja se gibaju





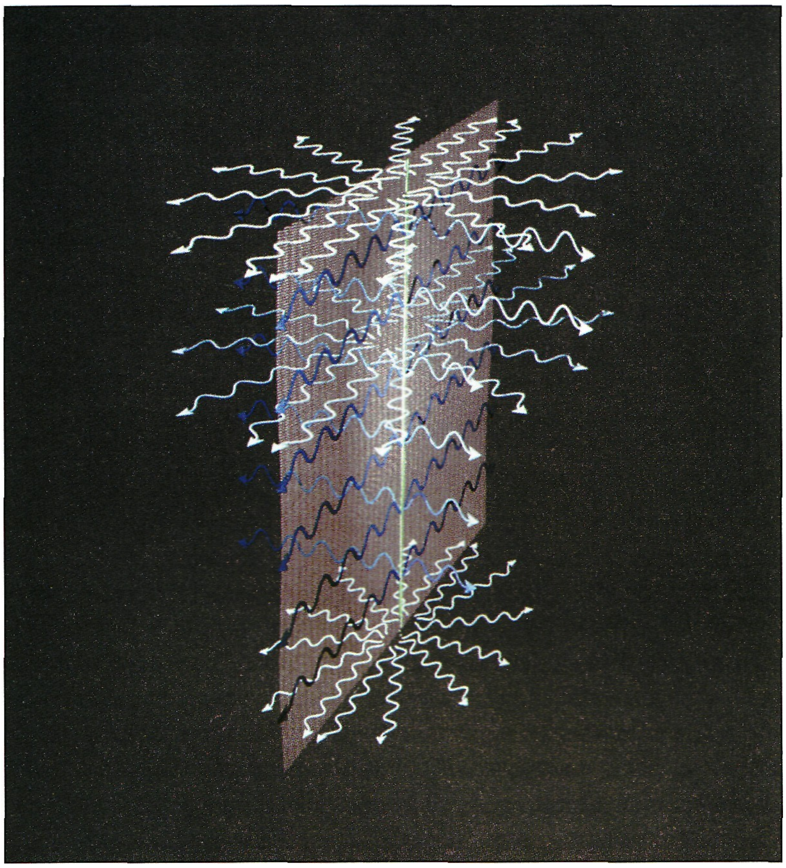
Dvije neutronske zvijezde gibaju se spiralno jedna prema drugoj.

Grafikon binarnog pulsara PSR1913+16 od 1975.

BINARNI PULSARI

Opća teorija relativnosti predviđa da masivna tijela koja se gibaju pod djelovanjem gravitacije emitiraju gravitacijske vale. Poput svjetlosnih valova, gravitacijski valovi odnose energiju iz objekata koji ih emitiraju. No, iznos ovog gubitka energije obično je izuzetno nizak, tako da ga je vrlo teško zabilježiti. Na primjer, zbog odašiljanja gravitacijskih valova Zemlja se postupno približava Suncu, no morat će proći 10^{27} godina da zbog toga padne na njega!

Doista, Russell Hulse i Joseph Taylor otkrili su 1975. binarni pulsar PSR1913+16, dvojni sustav koji se sastoji od dvije neutronske zvijezde koje kruže jedna oko druge na najvećem razmaku od jednog Sunčevog promjera. Prema općoj teoriji relativnosti, brzo gibanje znači da bi vrijeme ophoda u ovom sustavu trebalo znatno brže opadati zbog emitiranja snažnih gravitacijskih valova. Promjena kakvu predviđa opća teorija relativnosti savršeno se slaže s nalazima pažljivih promatranja parametara staza zvijezda koje su obavili Hulse i Taylor: od 1975. vrijeme ophoda se skratilo za više od deset sekundi. Godine 1993. oni su dobili Nobelovu nagradu za ovu potvrdu opće teorije relativnosti.



zbog djelovanja gravitacije mogu proizvoditi gravitacijske valove, neznatne promjene zakrivljenosti, mreškanja koja se šire kroz prostorvrijeme brzinom svjetlosti. Kao i elektromagnetski valovi svjetlosti, gravitacijski valovi bi trebali nositi energiju. Bilo je to predviđanje koje je potvrđeno promatranjem dvojnog pulsara PSR 1913 + 16.

Da zaista živimo na jednoj brani u prostorvremenu s dodatnim dimenzijama, gravitacijski valovi koje stvaraju tijela u gibanju na toj brani proširili bi se u druge dimenzije. Ako bi postojala druga brana, gravitacijski valovi odrazili bi se od nje i bili bi zarobljeni između dvije brane. Suprotno tome, ako postoji samo jedna brana, a dodatne dimenzije prostiru se u beskonačnost, kao u Randall-Sundrum modelu, gravitacijski valovi mogli bi potpuno pobjeći i odnijeti sa sobom energiju iz našeg branskog svijeta (il. 7.15).

(IL.7.15)
U Randall-Sundrum modelu, kratkovaln gravitacijski valovi mogu odnositi energiju iz izvora na brani, što dovodi do prividnog

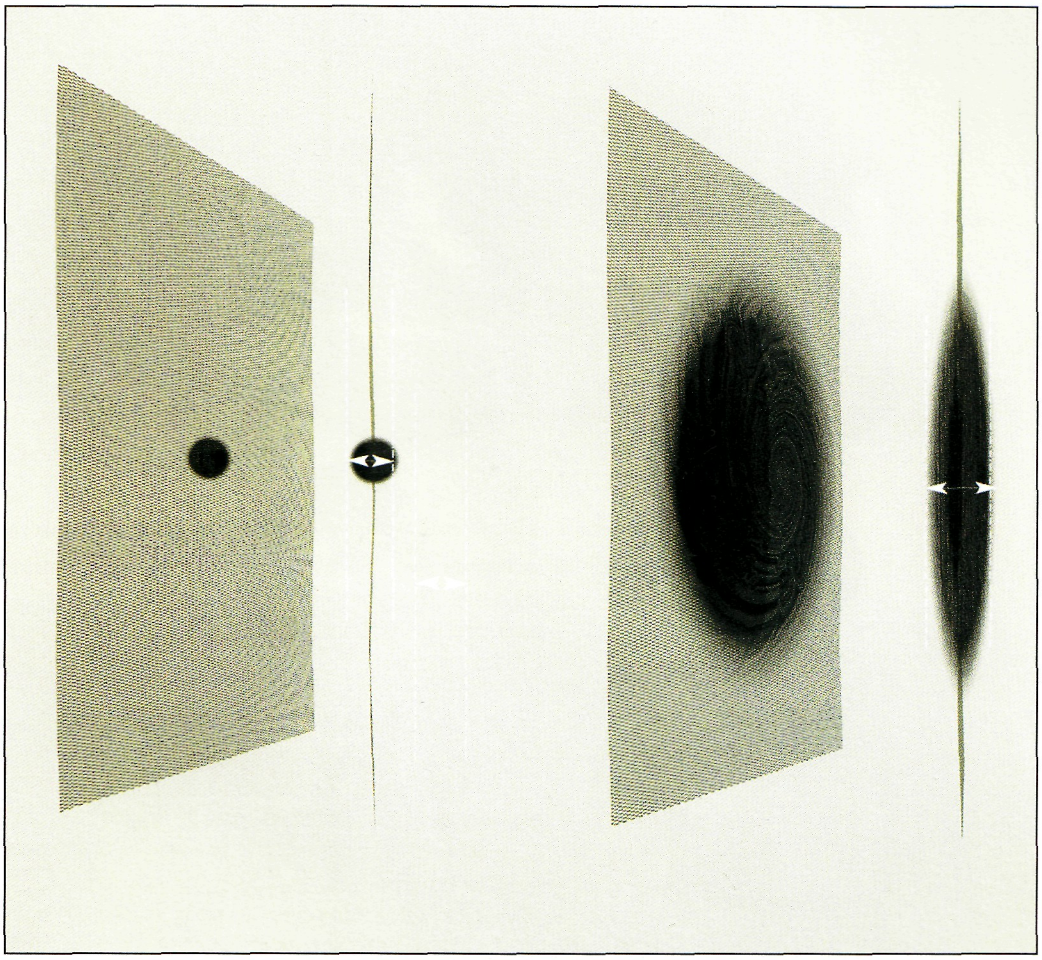
narušavanja zakona o sačuvanju energije.

Bio bi to težak udarac za jedno od temeljnih načela fizike: zakon o sačuvanju energije koji izriče da ukupna količina energije uvijek ostaje ista. To, međutim, izgleda kao kršenje samo zato što je naše viđenje onoga što se događa ograničeno na našu branu. Neki anđeo, koji bi mogao vidjeti dodatne dimenzije, znao bi da se količina energije ne mijenja već se samo drukčije raspoređuje.

Gravitacijski valovi koje stvaraju dvije zvijezde što kruže jedna oko druge imali bi valnu dužinu koja bi bila znatno veća od promjera zakrivljenosti sedlastog oblika u dodatnim dimenzijama. Stoga bi ti valovi — kao gravitacijske sile — bili pretežno ograničeni na maleno područje u neposrednom susjedstvu brane, što znači da ne bi značajnije bježali u dodatne dimenzije ili odnosili iz brane mnogo energije. Suprotno tome, mogli bi gravitacijski valovi čija je valna dužina kraća od radijusa zakrivljenosti dodatnih dimenzija lako pobjeći iz blizine brane.

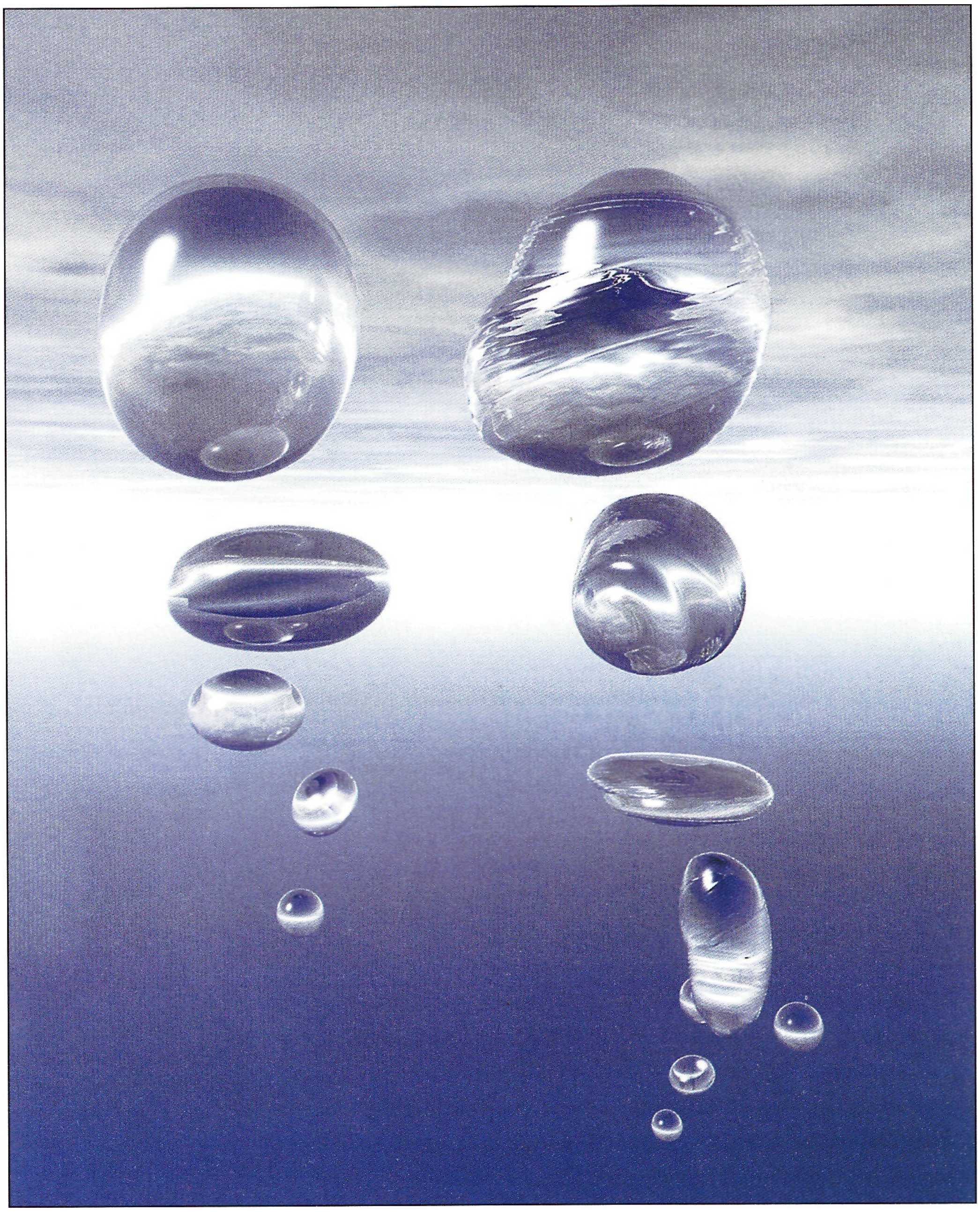
Jedini zamisliv izvor značajnijih količina kratkih gravitacijskih valova su crne jame. Crna jama na brani prodire također i u dodatne dimenzije. Ako je crna jama mala, bit će gotovo okrugla,- to znači da će dosegnuti u dodatne dimenzije približno onoliko kolika je njena veličina na brani. Za razliku od toga, velika crna jama na brani proširit će se u "crnu palačinku" koja bi bila ograničena na susjedstvo brane i u većem opsegu bi se raširila na brani negoli što bi prodirala u dodatne dimenzije (il. 7.16).

Kao što je objašnjeno u poglavlju 4, iz kvantne teorije slijedi da crne jame neće biti potpuno crne: one će emitirati čestice i zračenja svih vrsta kao topla tijela. Čestice i svjetlost poput zračenja bit će emitirane duž brane zato što će materija i negravitacijske sile, poput električne, biti ograničene na branu. Crne jame, međutim, emitiraju i gravitacijske valove. Ovi ne bi bili ograničeni na branu već bi putovali i u dodatne dimenzije. Ako je crna jama velika i u obliku palačinke, gravitacijski valovi ostali bi blizu brane. To bi značilo da bi crna jama gubila energiju (odnosno masu, shodno jednadžbi $E = mc^2$) u količini kakva bi se očekivala kod crne jame u četverodimenzionom prostorvremenu. Crna jama bi, dakle, lagano isparavala, a



veličina bi joj se smanjivala, sve dok ne bi postala manja od polumjera zakrivljenosti sedlasto zakrivljenih dodatnih dimenzija. Tog trenutka bi gravitacijski valovi koje emitira crna jama počeli slobodno bježati u dodatne dimenzije. Nekome na brani izgledalo bi da crna jama — ili tamna zvijezda kako ju je Michell nazvao (v. poglavlje 4) — emitira «tamno zračenje», zračenje koje se ne može neposredno zabilježiti na brani, ali čije postojanje proizlazi iz činjenice da crna jama gubi masu.

(IL 7.16)
Crna jama u našem svijetu na brani proširila bi se u dodatne dimenzije. Ako je crna jama mala, bila bi gotovo okrugla, no velika crna jama na brani proširila bi se u crnu jamu oblika palačinke u dodatnoj dimenziji.



(IL. 7.17) Nastanak nekog branskog svijeta mogao bi biti sličan nastanku mjehurića pare u kipućoj vodi.

To bi značilo da završni bljesak zračenja iz isparavajuće crne jame izgleda slabiji nego što stvarno je. Ovo je možda razlog zašto nismo zabilježili bljeskove gama-zračenja koji bi se mogli pripisati crnim jamama na umoru, premda bi drugo, prozaičnije, objašnjenje moglo biti da nema puno crnih jama s dovoljno malim masama da već ispare do vremena sadašnje starosti svemira.

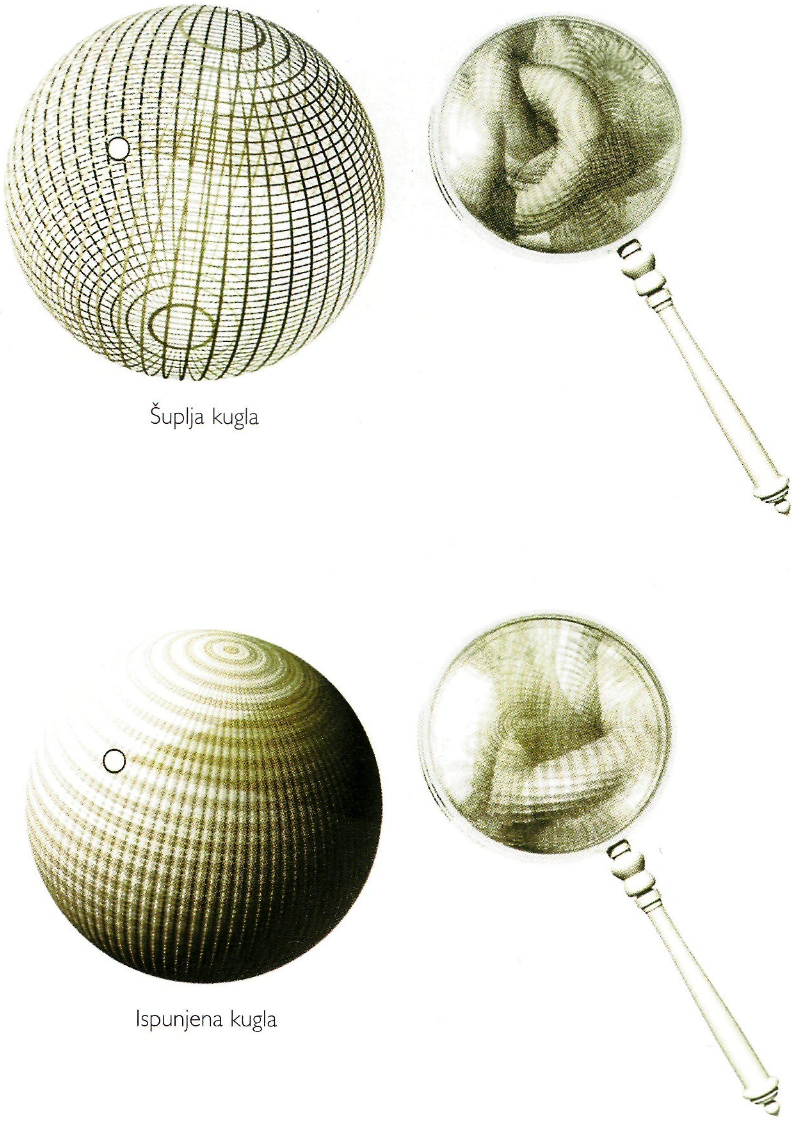
Zračenje iz crnih jama branskog svijeta proizlazi iz kvantnih fluktuacija čestica koje se pojavljuju na brani i nestaju s nje, ali i same brane, kao i sve drugo u svemiru, također su podložne kvantnim fluktuacijama. Ovo može dovesti do spontanog pojavljivanja i nestajanja brana. Kvantno stvaranje jedne brane pomalo bi nalikovalo na nastanak mjehurića pare u kipućoj vodi. Tekuća voda sastoji se od milijarda i milijarda zbijenih molekula H_2O, pri čemu su susjedne molekule labavo povezane. Kako se voda zagrijava, molekule se brže kreću i međusobno sudaraju. Povremeno bi prilikom ovih sudara molekule zadobile tako veliku brzinu da bi jedna skupina njih raskinula veze s ostalima i oblikovala mjehurić pare okružen vodom. Mjehur bi se tada povećavao ili smanjivao bez reda, odnosno priključivale bi mu se nove molekule ili bi se odvajale od njega. Većina malih mjehurića pare urušila bi se natrag u tekućinu, ali nekoliko bi ih naraslo do određene kritične veličine preko koje mjehuri gotovo sigurno nastavljaju rasti. Pri ključanju vode uočavaju se upravo ovi veliki, šireći mjehuri (il. 7.17).

Ponašanje branskih svjetova bilo bi slično tome. Načelo neodređenosti omogućilo bi pojavu branskih svjetova ni iz čega, nalik na mjehure, pri čemu bi brana bila površina mjehura, dok bi njegova unutrašnjost bila višedimenzioni prostor. Vrlo mali mjehurići urušili bi se natrag u nepostojanje, ali mjehur koji bi narastao pod utjecajem kvantnih fluktuacija preko određene kritične veličine vjerojatno bi nastavio rasti. Stvorenja (poput nas) koja žive na brani, površini mjehura, mislila bi da se svemir širi. Bilo bi to kao kada biste nacrtali galaktike na površini balona pa ga onda počeli napuhavati. Galaktike bi se odmicale jedne od drugih, no nijedna ne bi bila središte širenja. Nadajmo se da nema nikoga sa svemirskom pribadačom tko bi probušio balon.

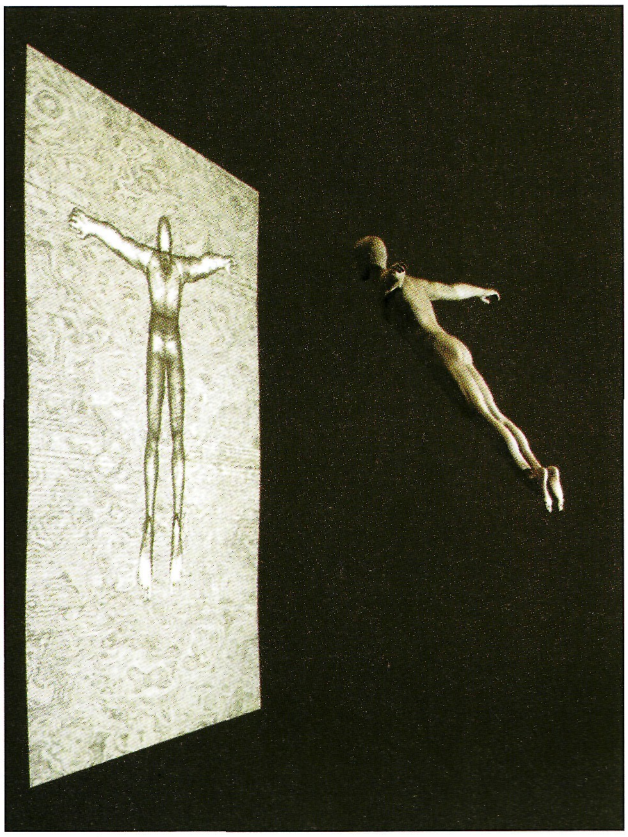
Prema ne-granica prijedlogu opisanom u poglavlju 3, spontano stvaranje branskog svijeta imalo bi prikaz povijesti u imaginarnom vremenu koji bi sličio orahovoj ljusci: bila bi to, naime, četverodimenziona lopta, slična površini Zemlje, ali s dvije dodatne dimenzije. Važna razlika krije se u tome što je orahova ljuska opisana u poglavlju 3 bila u biti šuplja: četverodimenziona lopta ne bi bila granica ničega, dok bi preostalih šest ili sedam dimenzija prostorvremena, koje predviđa M-teorija, bilo zajedno sklupčano u veličinama manjima od orahove ljuske. U slici novog branskog svijeta, međutim, orahova ljuska ne bi bila prazna: prikaz povijesti u imaginarnom vremenu brane na kojoj mi živimo bio bi četverodimenziona lopta koja bi tvorila granicu petodimenzionog mjehura, uz preostalih pet ili šest dimenzija sklupčanih u vrlo male veličine (il. 7.18).

Povijest brane u imaginarnom vremenu odredila bi njegovu povijest u stvarnom vremenu. U stvarnom vremenu brana bi se širila na ubrzani, inflacijski način, opisan u poglavlju 3. Savršeno ravna i okrugla orahova ljuska bila bi najvjerojatniji prikaz povijesti mjehura u imaginarnom vremenu. Ona bi, međutim, odgovarala brani koja se zauvijek širi na inflacijski način u stvarnom vremenu. Galaktike ne bi nastale na takvoj brani pa se tako ne bi razvio ni inteligentan život. Doduše, povijesti u imaginarnom vremenu koje nisu savršeno ravne i okrugle odlikovale bi se nešto nižim vjerojatnostima, ali bi odgovarale takvoj brani u stvarnom vremenu kod koje bi prvo nastupila faze ubrzanog, inflacijskog širenja, a zatim njegovo usporavanje. Tijekom usporenog širenja mogle bi nastati galaktike pa bi se tako mogao razviti i inteligentan život. Shodno antropskome načelu, samo one orahove ljuske koje imaju mala izbočenja mogu biti napučena inteligentnim bićima koja se pitaju zašto od iskona svemir nije potpuno gladak.

Širenjem brane povećavao bi se obujam višedimenzionog prostora u njegovoj unutrašnjosti. Konačno bi nastao ogroman mjehur optočen branom na kojoj mi živimo. No živimo li mi zaista na jednoj brani? Prema zamisli o holografiji opisanoj u poglavlju 2, informacije o tome što se događa u području prostorvremena mogu se kodirati na njegovoj granici. Možda mislimo da živimo u četverodimenzionom svijetu zato što smo sjene koje na branu baca ono

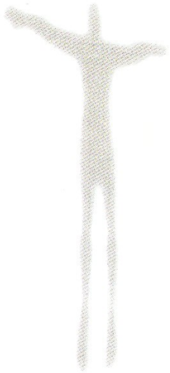


(IL 7.18)
Podrijetlo svemira kao branskog svijeta razlikuje se od onoga o kojem je bilo riječi u poglavlju 3, zato što blago spljoštena četverodimenziona lopta, ili orahova ljuska, nije više šuplja već je ispunjava peta dimenzija.



HOLOGRAFIJA

Holografija kodira informaciju u nekom području prostora na površinu za jednu dimenziju nižu. Čini se da je to svojstvo gravitacije, kako to proizlazi iz činjenice da područje događajnog obzora mjeri broj unutrašnjih stanja crne jame. U modelu branskog svijeta, holografija bi bila poklapanje, u odnosu jedan prema jedan, između stanja u četverodimenzionom svijetu i stanja u višim dimenzijama. S pozitivističkog gledišta, ne može se razlikovati koji je opis temeljniji.



što se zbiva u unutrašnjosti mjehura. Pozitivistički gledano, međutim, ne možemo postaviti pitanje: što je stvarno — brana ili mjehur? I jedno i drugo su matematički modeli koji opisuju naša promatranja. Na izboru nam je primijeniti bilo koji od ova dva modela.

Sto se nalazi izvan brane? Ima više mogućnosti (il. 7.19):

1. Izvana nema ničeg. Izvan mjehura pare nalazi se voda, doduše, ali ovo je samo analogija koja nam treba pomoći da predočimo sebi nastanak svemira. Mogao bi se zamisliti matematički model koji predstavlja samo branu s višedimenzionim prostorom unutra, dok izvana nema apsolutno ničeg, čak ni praznog prostora. Mogu se izračunati predviđanja iz matematičkog modela, bez obzira na to što je izvana.

2. Može se osmisliti matematički model u kojem je vanjska strana mjehura zalijepljena na vanjsku stranu jednakog, iznutra prema van izokrenutog drugog mjehura. Ovaj model, zapravo, matematički odgovara prethodno opisanoj mogućnosti da nema ničeg izvan mjehura, ali postoji psihološka razlika: ljudima je draža pomisao da se nalaze u središtu prostorvremena, umjesto na njegovom rubu; no, za jednog pozitivista prva i druga mogućnost su istovjetne.

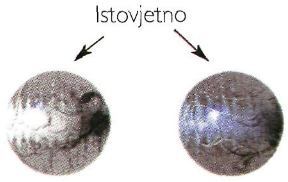
3. Mjehur bi mogao stršiti u neki prostor koji ne bi bio zrcalna slika onoga što se u mjehuru nalazi. Ova mogućnost različita je od dvije prethodno razmotrene i sličnija je primjeru s kipućom vodom. Drugi mjehuri također mogu nastati i širiti se. Ako bi se sudarili i stopili s ovim u kojem mi živimo, ishod bi bio katastrofalan. Izložena je čak zamisao da je, zapravo, Veliki prasak nastao kao posljedica sudara brana.

Modeli branskog svijeta poput ovih plod su najnovijih istraživanja. Oni su u velikoj mjeri spekulativni, ali nude nove mogućnosti koje se mogu provjeriti promatranjima. Time bi se moglo i objasniti zasto je gravitacijska sila tako slaba. Gravitacija je možda vrlo jaka u osnovnoj teoriji, ali širenje sile teže u dodatne dimenzije imalo bi za posljedicu da će ona biti slaba na velikim udaljenostima na brani na kojoj živimo.

Posljedica ovoga bila bi da će Planckova dužina, najmanja udaljenost koju možemo dosegnuti, a da automatski ne stvorimo crnu jamu, biti znatno veća nego što to izgleda na temelju slabe sile teže na našoj četverodimenzionoj brani. Najmanja ruska babuška ne bi bila tako sićušna: mogla bi se naći u dosegu snage budućih ubrzivača čestica. Već smo možda i mogli otkriti najmanju

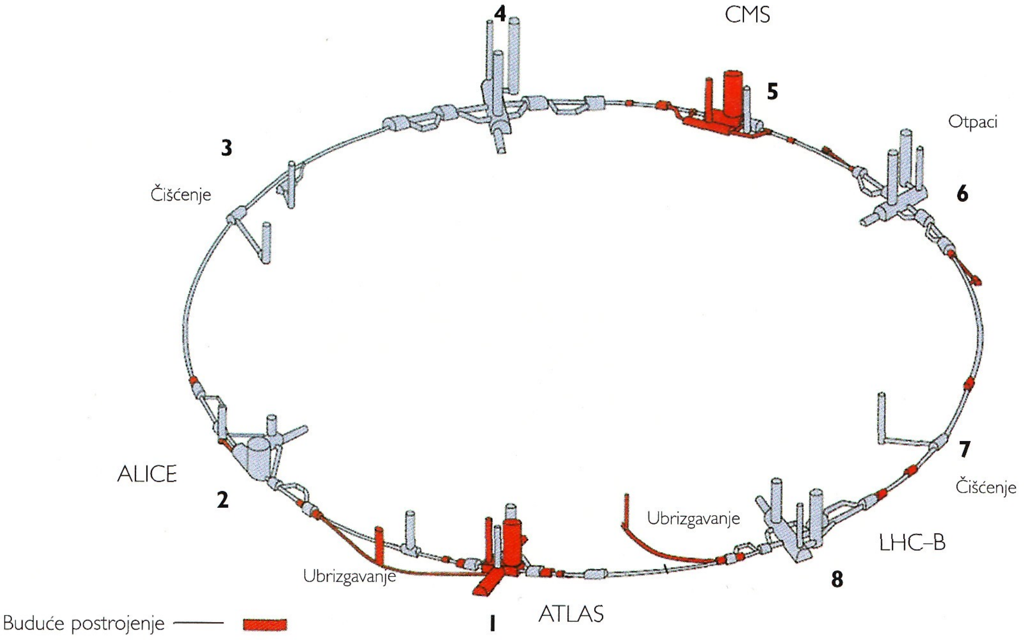
(IL. 7.19)

1. Brana/mjehur s višedimenzionim prostorom unutra, a ničim izvana.



2. Mogučnost da je vanjština jedne brane/-mjehura prilijepljena na vanjštinu nekog drugog mjehura.

3. Brana/mjehur širi se u prostor koji nije zrcalna slika onoga što je unutra. U ovom scenariju mogu se oblikovati i širiti i druge brane.

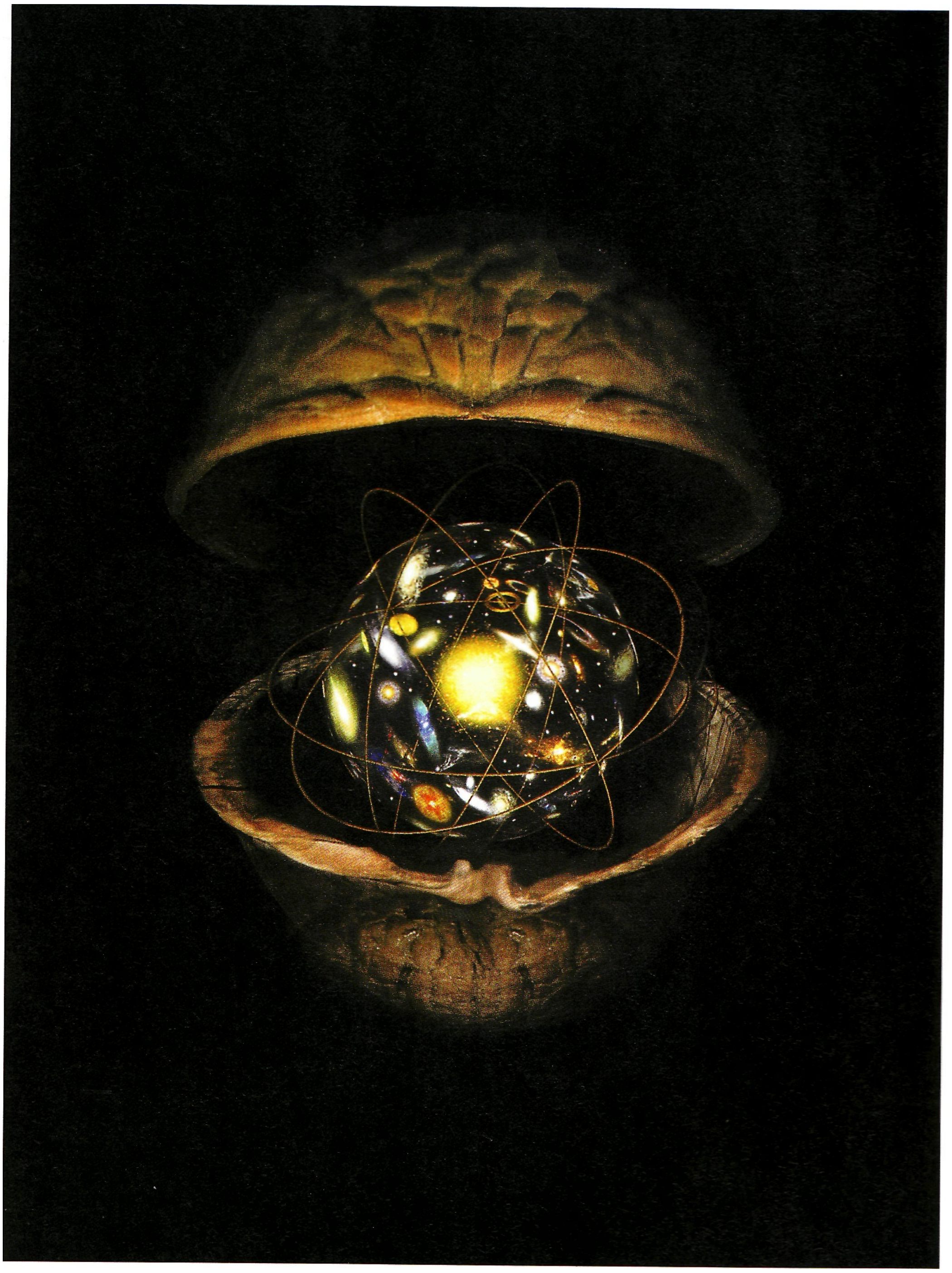


(IL 7.20)
Plan LEP tune!a prikazuje postojeću infrastrukturu i buduća postrojenja Velikog hadronskog sudarača (LHC) u blizini Ženeve, Švicarska.

babušku, temeljnu Planckovu dužinu, da Sjedinjene Američke Države nisu, u jednome napadu straha pred siromaštvom, 1994. ukinule financiranje Supervodljivog supersudarača (SSC), premda je već napola bio završen. Trenutno se grade drugi akceleratori čestica, kakav je, na primjer, Veliki sudarač hadrona (LHC) u blizini Zeneve (il. 7.20). Pomoću njih, kao i novih promatranja, na primjer mikrovalnog pozadinskog zračenja, možda ćemo moći ustanoviti živimo li na jednoj brani ili ne. Ako da, onda je to vjerojatno zato što antropsko načelo bira prikladne branske modele iz golemog zoološkog vrta svih svemira koje dopušta M-teorija. Mogli bismo stoga, oslonjeni na Mirandu iz Shakespeareove *Oluje,* reći:

O *divni branski novi svijete,*
kad u tebi takvi stvorovi žive.

To je svemir u orahovoj ljusci. *In nuce.*



Rječnik

Amplituda
Najveća visina vrha vala ili najveća dubina dola vala.

Antičestica
Svaka vrsta čestica materije ima parnjaka antičesticu. Kada se čestica i antičestica sudare, međusobno se ponište pretvarajući se u energiju.

Antropsko načelo
Zamisao o tome da svemir vidimo ovakvim kakav je zato što, da je drukčiji, nas ne bi ni bilo da ga gledamo.

Apsolutna nula
Najniža moguća temperatura na kojoj tvari ne sadrže ništa od toplinske energije; oko -273 stupnja Celzija odnosno 0 Kelvina.

Apsolutno vrijeme
Zamisao o postojanju univerzalne ure. Einsteinova teorija relativnosti opovrgla je ovu zamisao.

Atom
Osnovna jedinica obične materije; sastoji se od majušne jezgre (u čiji sastav ulaze protoni i neutroni) i elektrona koji kruže oko nje.

Beskonačnost
Neograničeno ili beskrajno pružanje ili broj.

Bozon
Cestica ili ustroj nastao vibriranjem struna, a čiji je spin cijeli broj.

Brana
Temeljna jedinica M-teorije, koja može imati mnoštvo prostornih dimenzija. Općenito govoreći, jedna p-brana ima dužinu u p smjerova; 1 -brana je struna, 2-brana je površina membrane i tako dalje.

Branski svijet
Cetverodimenziona površina ili brana u višedimenzionom prostorvremenu.

Brzina
Promjena položaja nekog tijela u jedinici vremena.

Crna jama
Područje prostorvremena kojeg ništa, čak ni svjetlost, ne može napustiti zbog prejake gravitacije.

Crveni pomak
Pomak prema crvenom kraju spektra, zbog Dopplerovog učinka, nekog zračenja što ga emitira tijelo koje se udaljava od promatrača.

Crvotočine
Majušne cijevi prostorvremena koje povezuju udaljena područja svemira. Crvotočine također mogu spajati paralelne svemire ili djecu-svemire, a mogle bi pružiti mogućnost putovanja kroz vrijeme.

DNK
Dezoksiribonukleinska kiselina građena od fosfata, šećera i četiri baze: adenina, gvanina, timina i citozina. Dvije niti DNK oblikuju dvostruku zavojnicu sličnu spiralnim stubama. U DNK nalaze se šifrirane sve informacije koje su stanicama potrebne za razmnožavanje. Ona također ima ključnu ulogu u naslijeđu.

Događaj
Točka u prostorvremenu određena svojim položajem i vremenom.

Dogadajni obzor
Rub crne jame; granica područja iz kojeg nije moguće pobjeći u beskonačnost.

Dopplerov učinak
Pomak frekvencija i valnih dužina zvučnih i svjetlosnih valova koji zapaža promatrač kada se izvor giba u odnosu na njega.

Drugi zakon termodinamike
Zakon koji izriče da entropija uvijek raste, a da se nikad ne može smanjivati.

Dvojnost val/čestica
Zamisao u okviru kvantne mehanike da nema razlike između vala i čestica; čestice se mogu ponašati kao valovi i obratno.

Dvojnost
Poklapanje između prividno različitih teorija koje vodi do istih fizikalnih rezultata.

Elektromagnetna sila
Sila koja se javlja između električki nabijenih čestica istog (odnosno, suprotnog) znaka.

Elektromagnetski val
Valni poremećaj u električnom polju. Svi valovi elektromagnetskog spektra putuju brzinom svjetlosti: vidljiva svjetlost, rendgenske zrake, mikrovalovi, infracrveno zračenje i tako dalje.

Elektron
Čestica s negativnim električnim nabojem koja kruži oko jezgre atoma.

Elementarna čestica
Čestica za koju se smatra da se ne može dalje dijeliti.

Energija vakuuma
Energija koja je prisutna čak i u prividno praznom prostoru i koja se odlikuje jednim neobičnim svojstvom. Za razliku od postojanja mase, postojanje ove vakuumske energije izaziva ubrzanje širenja svemira,

Entropija
Mjera nereda nekog fizičkog sustava; broj različitih mikroskopskih konfiguracija jednog sustava čiji makroskopski izgled ostaje nepromijenjen.

Eter
Hipotetski nematerijalni medij za koji se nekada smatralo da ispunjava sav prostor. Zamisao da je takav medij neophodan za prenošenje elektromagnetskog zračenja nije više održiva.

Fermion
Čestica ili uzorak vibracije struna čiji je spin polovina cijelog broja.

Fotoelektrični efekt
Način na koji određeni metali oslobadaju elektrone kad na njih padne svjetlost.

Foton
Kvant svjetlosti,- najmanji paket elektromagnetskog polja,

Frekvencija
Kod valova, broj potpunih periodičnih promjena u sekundi.

Gola singularnost
Prostorvremenska singularnost koja nije okružena crnom jamom i koju udaljeni promatrač može vidjeti.

Granični uvjeti
Početno stanje fizičkog sustava ili, općenitije, stanje sustava na granici u prostoru i vremenu.

Grassmannovi brojevi
Klasa brojeva za koje ne vrijedi zakon komutacije. Kod običnih stvarnih brojeva svejedno je kako se množi: A x B = C isto je što i B x A = C. Grassmanovi brojevi, međutim, antikomutiraju, u smislu da je A x B isto što i —B x A.

Gravitacijska sila
Najslabija od četiri temeljne sile pirode.
Gravitacijski valovi
Valni poremećaj u gravitacijskom polju.
Gravitacijsko polje
Sredstvo preko kojeg gravitacija prenosi svoj utjecaj.

Holografska teorija
Zamisao da se kvantna stanja nekog sustava u danom području prostorvremena mogu kodirati na granici tog područja.

Imaginarni broj
Apstraktna matematička konstrukcija. Stvarni i imaginarni brojevi mogu se zamisliti tako kao da zauzimaju položaje točaka u ravnini, pri čemu su imaginarni brojevi pod pravim kutom u odnosu na obične stvarne brojeve.
Imaginarno vrijeme
Vrijeme koje se mjeri upotrebom imaginarnih brojeva.
Inflacija
Kratko razdoblje ubrzanog širenja tijekom kojeg je veličina ranog svemira porasla za silno velik faktor.
Iskonska crna jama
Crna jama nastala u ranom svemiru.

Jaka sila
Najjača od četiri temeljne sile, ali s najmanjim dosegom. Drži na okupu kvarkove koji grade protone i neutrone, te njih zajedno drži u jezgri atoma.
Jedinstvena teorija
Svaka teorija koja opisuje sve četiri sile i materiju unutar jednog cjelovitog, jedinstvenog teorijskog okvira.
Jezgra
Središnji dio atoma građen od protona i neutrona koje na okupu drži jaka sila.

Casimirov učinak
Privlačna sila između dvije ravne, usporedne, metalne ploče na vrlo maloj međusobnoj udaljenosti u vakuumu. Ta tlačna sila nastaje zbog smanjenja uobičajenog broja virtualnih čestica u prostoru između ploča.
Kelvi nova skala
Temperaturna skala u kojoj se temperatura računa počevši od apsolutne nule.
Klasična teorija
Teorija zasnovana na pojmovima ustanovljenim prije teorije relativnosti i kvantne mehanike. U njoj se pretpostavlja da tijela imaju sasvim određene i položaje i brzine. No, ovo ne vrijedi u vrlo malim razmjerima, kao što to pokazuje Heisenbergovo načelo neodređenosti.
Kozmička struna
Dugačak, težak objekt malog poprečnog presjeka koji je možda nastao u ranim trenutcima svemira. Do sada se jedna struna možda rastegla preko cijelog svemira.
Kozmologija
Proučavanje svemira kao cjeline.
Kosmološka konstanta
Matematičko sredstvo što ga je upotrijebio Einstein pridajući time svemiru ugrađenu težnju za širenjem, što bi dopustilo da opća teorija relativnosti predvidi statičan svemir.
Kvant
Nedjeljiva jedinica kao mjera za apsorbirano ili emitirano zračenje.
Kvantna gravitacija
Teorija koja povezuje kvantnu mehaniku i opću teoriju relativnosti.
Kvantna mehanika
Fizički zakoni koji vladaju područjem vrlo malog — atomima, protonima i

slično; proizišla je iz Planckovog kvantnog načela i Heisenbergovog načela neodređenosti.

Kvark

Električki nabijena elementarna čestica koja osjeća jaku silu. Kvarkovi se javljaju u šest oblika koji se nazivaju "ukusi": gore, dolje, čudni, šarm, dno, vrh. Svaki ukus ima tri "boje": crvenu, zelenu i plavu.

Lorentzova kontrakcija

Skraćivanje tijela u pravcu gibanja, kao što to izriče opća teorija relativnosti.

M-teorija

Teorija koja objedinjuje svih pet teorija struna te supergravitaciju u jedinstven teorijski okvir, ali i koja još nije potpuno razumljiva.

Magnetno polje

Polje odgovorno za magnetske sile.

Makroskopsko

Dovoljno veliko da se vidi golim okom; riječ se obično koristi za veličine do 0,01 mm. Za veličine manje od ovih kaže se da su mikroskopske.

Maxwellovo polje

Sinteza elektriciteta, magnetizma i svjetlosti u dinamička polja koja mogu oscilirati i gibati se kroz prostor.

Masa

Količina tvari u nekom tijelu; njena inercija ili otpor ubrzanju u slobodnom prostoru.

Mikrovalno pozadinsko zračenje

Zračenje preostalo od užarenog ranog svemira; sada ima toliki crveni pomak da izgleda ne više kao svjetlost nego kao mikrovalovi (radio-valovi s valnim dužinama od nekoliko centimetara).

Mooreov zakon

Zakon prema kome se snaga računala udvostručuje svakih osamnaest mjeseci. Ovo se, očigledno, ne može nastaviti unedogled.

Naboj

Svojstvo čestice kojim može odbijati (odnosno, privlačiti) druge čestice istog (odnosno suprotnog) znaka.

Načelo isključenja

Dvije jednake spin 1/2 čestice ne mogu imati (unutar granica postavljenih načelom neodređenosti) i isti položaj i istu brzinu.

Načelo neodređenosti

Heisenbergovo načelo prema kome nije moguće istodobno točno poznavati i položaj i brzinu neke čestice. Što se jedno točnije zna, to je drugo manje točno izmjerivo.

Ne-granica

Zamisao da je svemir konačan, ali nema granice u imaginarnom vremenu.

Neutrino

Cestica bez naboja na koju djeluje samo slaba sila.

Neutron

Cestica bez naboja, vrlo slična protonu, na koju otpada približno polovina čestica u atomskoj jezgri. Sastoji se od tri kvarka (2 dolje i 1 gore).

Newtonova teorija opće gravitacije

Teorija prema kojoj sila privlačenja između dva tijela zavisi od njihove mase i međusobne udaljenosti; sila je upravno razmjerna umnošku masa, a obrnuto razmjerna kvadratu udaljenosti.

Newtonovi zakoni gibanja

Zakoni koji opisuju gibanja tijela, temeljeni na pretpostavci o apsolutnom prostoru i vremenu. Bili su nepobitni sve do Einstenovog utemeljenja specijalne teorije relativnosti.

Nuklearna fisija
Proces cijepanja atomske jezgre na dvije ili više manjih jezgara, pri čemu se oslobađa energija.

Nuklearna fuzija
Proces sudaranja i stapanja atomskih jezgri, nakon čega nastaje od njih nova, veća jezgra.

Opća teorija relativnosti
Einsteinova teorija utemeljena na zamisli da bi zakoni fizike trebali biti isti za sve promatrače, bez obzira na to kako se gibaju. Ona objašnjava gravitacijsku silu u smislu zakrivljenosti četverodimenzionog prostorvremena.

Osnovno stanje
Stanje sustava s minimumom energije.

Očuvanje energije
Prirodni zakon koji izriče da se energija (ili njen ekvivalent u masi) ne može ni stvoriti niti uništiti.

P-brana
Brana s p dimenzija. *Vidjeti također* Brana.

Planckova dužina
Oko 10^{-35} cm. Veličina tipične strune u teoriji struna.

Planckova konstanta
Ugaoni kamen načela neodređenosti — umnožak neodređenosti položaja i brzine mora biti uvijek veći od Planckove konstante.
Obilježava se simbolom h.

Planckovo kvantno načelo
Zamisao da se elektromagnetski valovi (na primjer, svjetlost) mogu emitirati i apsorbirati samo u diskretnim, određenim količinama — kvantima.

Planckovo vrijeme
Oko 10^{-43} sekunde; vrijeme potrebno da svjetlost prevali Planckovu dužinu.

Plavi pomak
Skraćivanje valnih dužina zračenja što ga emitiraju objekti koji se gibaju prema promatraču, uzrokovano Dopplerovim učinkom.

Polje sile
Sredstvo kojim sila prenosi svoje djelovanje.

Polje
Nešto što postoji diljem prostora i vremena, za razliku od čestice koja postoji samo u jednoj točki i u neko vrijeme.

Pomrčina Sunca
Nebeska pojava koja se događa kad se Mjesec nađe između Zemlje i Sunca; s jednog mjesta na Zemlji može se promatrati samo nekoliko minuta. Promatranje pomrčine iz zapadne Afrike 1919. dokazalo je ispravnost opće teorije relativnosti.

Promatrač
Osoba ili uređaj koji mjere fizička svojstva nekog sustava.

Pozitivni pristup
Zamisao da je znanstvena teorija matematički model koji opisuje i sastavlja zakone iz nalaza promatranja.

Pozitron
Električki pozitivno nabijena antičestica elektrona.

Početno stanje
Stanje nekog fizičkog sustava na njegovom početku.

Pretpostavka o zaštiti kronologije
Zamisao o uroti zakona fizike koji sprečavaju makroskopskim objektima vraćanje u prošlost.

Prostorna dimenzija
Bilo koja od tri prostorvremenske dimenzije koja se odnosi na prostor.

Prostorvrijeme
Četverodimenzioni prostor čije su točke događaji.

Proton
Električki pozitivno nabijena čestica, vrlo slična neutronu, na koju otpada približno polovina mase jezgre atoma. Građen je od tri kvarka (2 gore i 1 dolje).

Radioaktivnost
Spontano raspadanje neke atomske jezgre i pretvaranje u neku drugu.

Randall-Sundrum model
Teorija prema kojoj mi živimo na brani u beskonačnom petodimenzionom prostoru negativne zakrivljenosti nalik na sedlo.

Savijena dimenzija
Prostorna dimenzija koja je savijena do tako malih veličina da ju je nemoguće otkriti.

Schrodingerova jednadžba
Jednadžba koja upravlja razvojem **valne** funkcije u kvantnoj teoriji.

Singularnost
Točka u prostorvremenu u kojoj njegova zakrivljenost postaje beskonačna.

Slaba sila
Treća po jačini od četiri temeljne sile, vrlo je kratkog dometa. Djeluje na sve čestice materije, ali ne i na čestice koje nose sile.

Slobodan prostor
Dio vakuumskog prostora potpuno bez polja, odnosno na koji ne djeluje nikakva sila.

Specijalna teorija relativnosti
Einsteinova teorija utemeljena na zamisli da su zakoni prirode isti za sve promatrače koji se bilo kako gibaju u prostoru bez gravitacijskog polja.

Spektar
Sve frekvencije elektromagnetskog zračenja. Vidljivi dio Sunčevog spektra ponekad se može vidjeti kao duga na nebu.

Spin
Unutarnje svojstvo elementarnih čestica koje je blisko, ali ne i sasvim istovjetno, uobičajenoj predodžbi o vrtnji.

Stacionarno stanje
Stanje koje se ne mijenja tijekom vremena.

Standardni model fizike čestica
Jedinstvena teorija tri negravitacijske sile i njihovih utjecaja na materiju.

Standardni model kozmologije
Teorija Velikog praska povezana sa standardnim modelom fizike čestica.

Struna
Temeljni jednodimenzioni objekt u teoriji struna koji zamjenjuje zamisao o elementarnim česticama bez strukture. Različiti oblici vibriranja strune predstavljaju **elementarne** čestice različitih osobina.

Supergravitacija
Niz teorija koje objedinjuju opću teoriju relativnosti i supersimetriju.

Supersimetrija
Načelo koje povezuje svojstva čestica različitog spina.

Svjetlosna godina
Put koji svjetlost prevali u jednoj godini.

Svjetlosna sekunda
Put koji svjetlost prevali u jednoj sekundi.

Svjetlosni stožac
Površina u prostorvremenu koja obilježava mogući pravac svjetlosnih zraka što prolaze kroz zadani događaj.

Tamna tvar
Tvar u galaktikama i jatima, a možda i između jata, koja se ne može neposred-

no promatrati, ali se može otkriti po gravitacijskom polju koje stvara. Čak devedeset posto tvari u svemiru otpada na tamnu tvar.

Teorem singularnosti
Teorem koji pokazuje da singularnost, točka u kojoj zakazuje opća teorija relativnosti, mora postojati pod određenim okolnostima,- svemir je, na primjer, morao započet« iz singularnosti.

Teorija struna
Fizikalna teorija u kojoj se čestice opisuju kao valovi na struni,- objedinjuje kvantnu mehaniku i opću teoriju relativnosti. Poznata i kao teorija superstruna.

Termodinamika
Proučavanje odnosa između energije, rada, topline i entropije u dinamičnom fizičkom sustavu.

Težina
Sila kojom na tijelo djeluje gravitacijsko polje. Razmjerna je masi, ali ne i istovjetna s njom.

Ubrzivač čestica
Promjena brzine ili pravca gibanja nekog objekta. *Vidjeti također* Brzina.

Uzorak interferencije
Valni uzorak koji nastaje spajanjem dva ili više vala odaslanih s različitih mjesta ili u različita vremena.

Valna dužina
Razmak između dva susjedna dola ili dva susjedna brijega vala.

Valna funkcija
Temeljni pojam kvantne mehanike,- broj u bilo kojoj točki prostora pridružen nekoj čestici, a određuje vjerojatnost da će se ona naći na tome mjestu.

Velika jedinstvena teorija
Teorija koja objedinjuje elektromagnetsku, jaku i slabu silu.

Veliki prasak
Singularnost na početku svemira, prije otprilike petnaest milijarda godina.

Veliko sažimanje
Naziv za jedan od mogućih scenarija završetka svemira,- sav prostor i sva materija urušavaju se, tvoreći singularnost.

Virtualna čestica
U kvantnoj mehanici, čestica koja se nikada ne može neposredno otkriti, ali čije postojanje ima mjerljiva djelovanja. *Vidjeti također* pod "Casimirov učinak".

Vremenska dilatacija
Posljedica specijalne teorije relativnosti koja predviđa da će se protjecanje vremena usporiti za promatrača u gibanju ili pod utjecajem jakog gravitacijskog polja.

Vremenska petlja
Drugi naziv za zatvorenu vremensku krivulju.

T ang-Millsova teorija
Proširenje Maxwellove teorije polja. Opisuje međudjelovanje slabe i jake sile.

2_atvorena struna
Tip strune u obliku petlje.

Znanstveni determinizam
Laplaceova zamisao o svemiru kao satnom mehanizmu,- potpuni uvid u njegovo stanje omogućava da se ono predvidi i za bilo koje prošlo ili buduće vrijeme.

Zračenje
Energija koja se prenosi valovima ili česticama kroz prostor ili neki drugi medij.